



# 第1章 放大电路的建模与分析

## 之2 多级放大与频率特性

本节主要讨论：

- 放大电路的耦合方式
- 多级放大电路的性能分析与计算
- 三极管和场效应管的高频小信号模型
- 放大电路的分频段分析方法与一般表达式
- 放大电路频率特性的Bode图表示

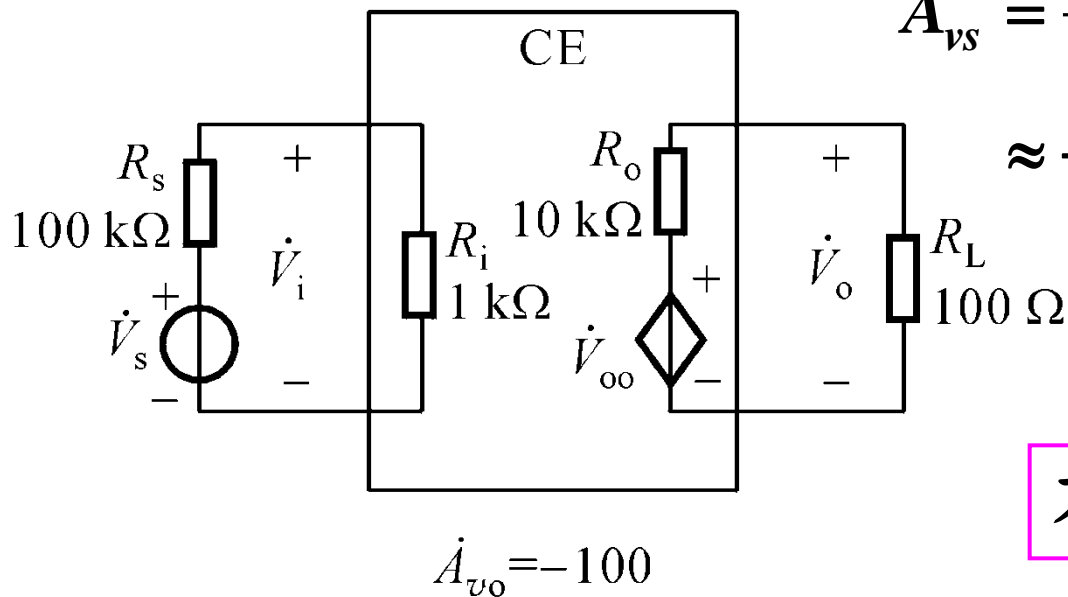


## 1.4 多级放大电路的分析

多级放大电路可以充分利用各个单级放大电路的优点，满足各种不同的要求。

【示例】要求对输入信号进行放大，但输入为高内阻的信号源(设 $R_s=100\text{k}\Omega$ )，负载阻值较小(设 $R_L=100\Omega$ )。

◇ 若采用CE放大电路：

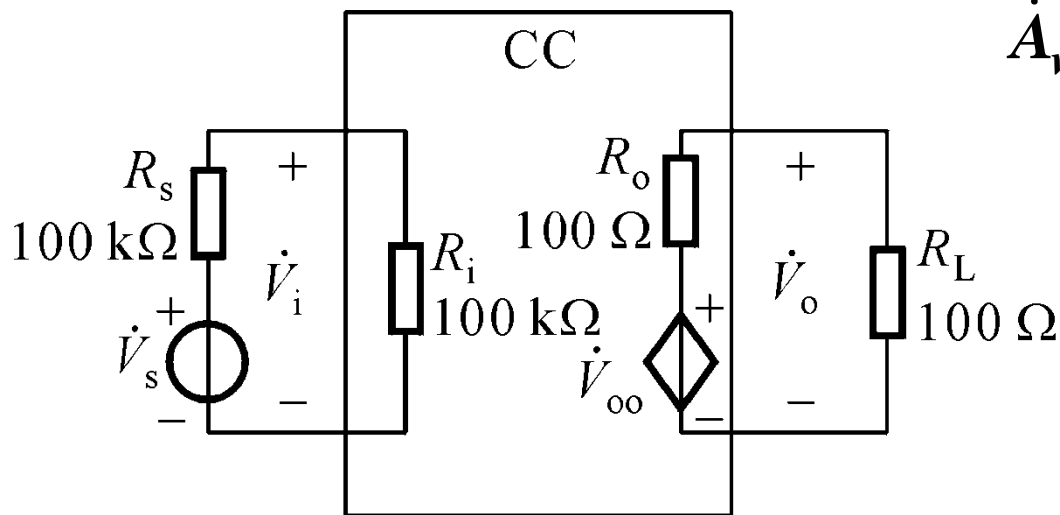


$$\dot{A}_{vs} = \frac{1}{100+1} \times (-100) \times \frac{0.1}{0.1+10} \approx -0.01$$

不能达到放大要求。



## ◇ 若采用CC放大电路：



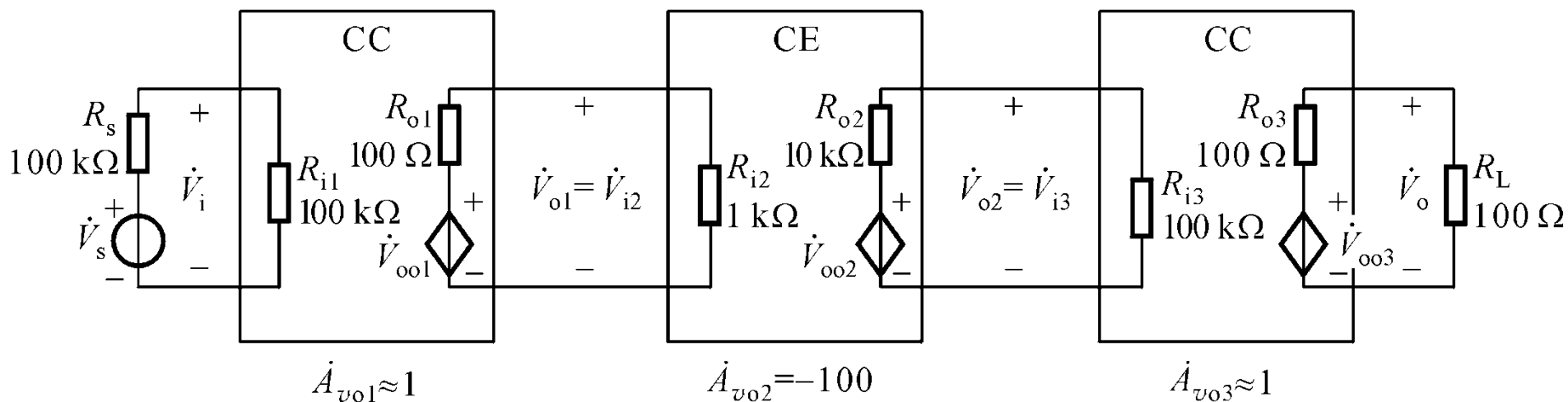
$$\begin{aligned}\dot{A}_{vs} &= \frac{100}{100+100} \times 1 \times \frac{0.1}{0.1+0.1} \\ &= 0.25\end{aligned}$$

$$\dot{A}_{vo} \approx 1$$

1. CC电路也不能达到放大要求。
2. 尽管CE放大电路的开路电压放大倍数比CC放大电路大，但是由于CE电路的 $R_i$ 较小且 $R_o$ 较大，CE电路的源电压放大倍数反而CC电路要小。
3. 如何达到所要求的放大作用？

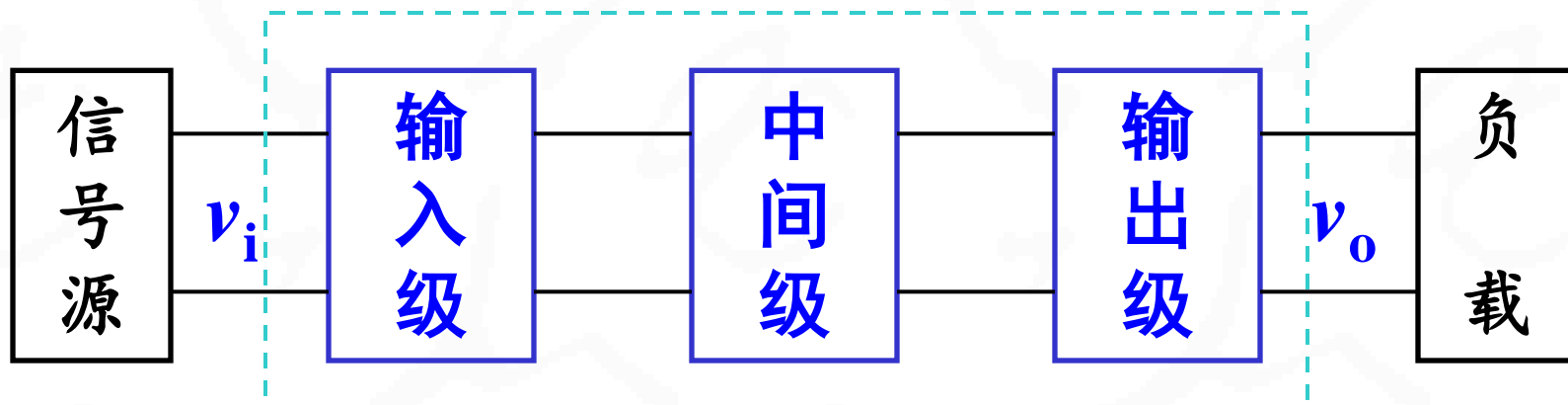


## ☆ 可采用多级放大电路：



可见，采用多级放大电路可以充分利用各种放大组态的优点，满足实际系统的要求。

## ➤ 多级放大电路各级组态的选择



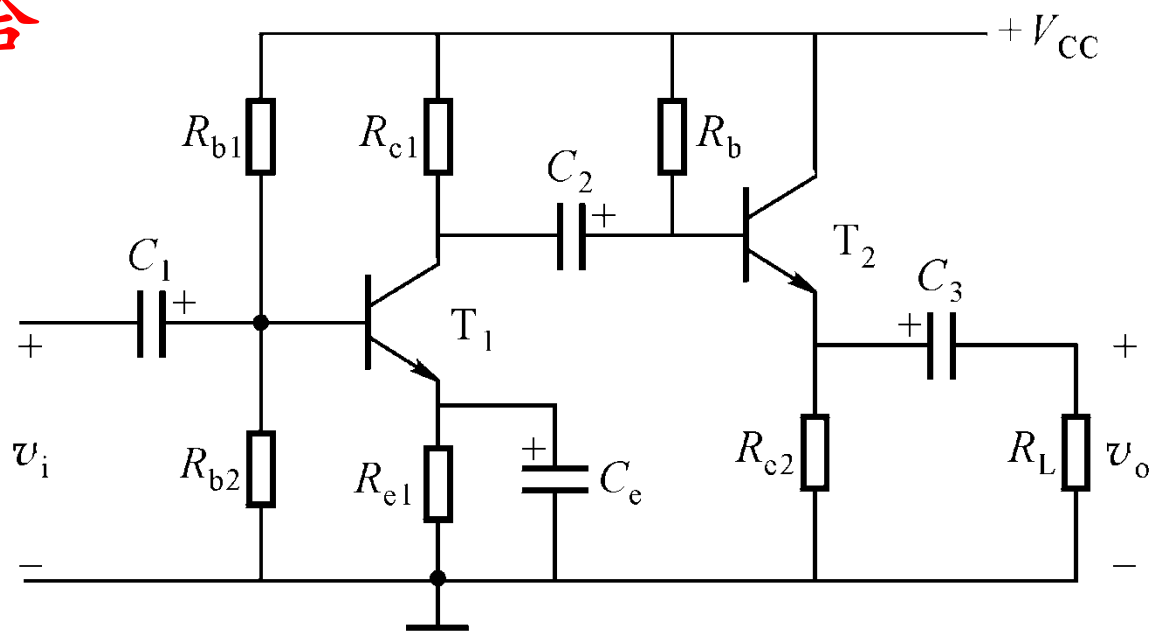
- ✧ 输入级：主要考虑对输入电阻的要求。**输入电阻应尽可能高**，以最大限度地利用信号源信号电压，常选择共集放大电路或其它输入阻抗高的放大电路。
- ✧ 中间级：主要作用是放大信号电压，主要考虑如何**提高电压放大倍数**，因此应选择电压放大倍数较大的共射放大电路。
- ✧ 输出级：主要作用是输出具有一定功率的信号，主要应考虑**对输出电阻的要求**。通常选择共集或其它功率放大电路。



## 一、多级放大电路的级间耦合方式

连接原则：①静态时各级应设置合适的静态工作点；  
②动态时信号能实现畅通有效的传递。

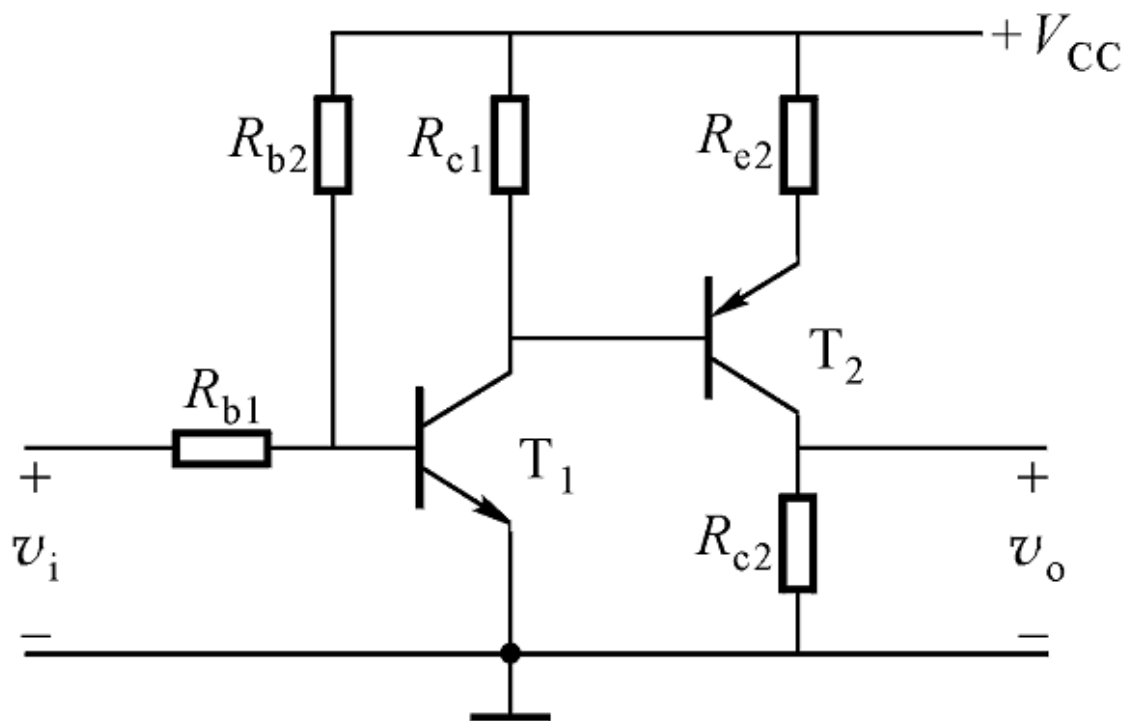
### ◇ 阻容耦合



优点是电路简单，在分立元件电路中应用广泛。  
缺点是低频响应较差，不便于集成化。



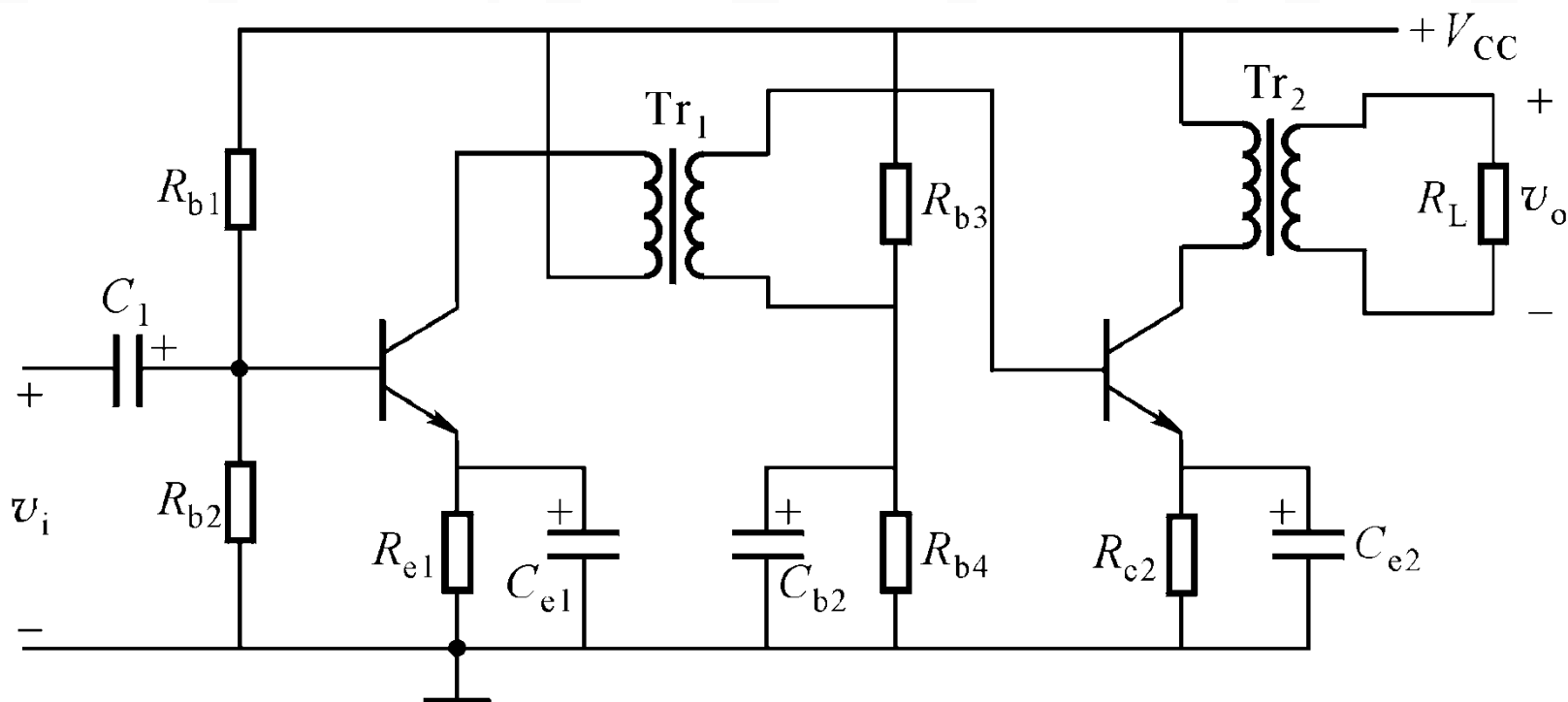
## ◇ 直接耦合



优点是**低频特性好**，可以放大变化缓慢的信号，**易于集成化**。缺点是各级静态工作点相互影响，分析、设计和调试较困难；并且还存在**零点漂移**问题。



## ☆ 变压器耦合

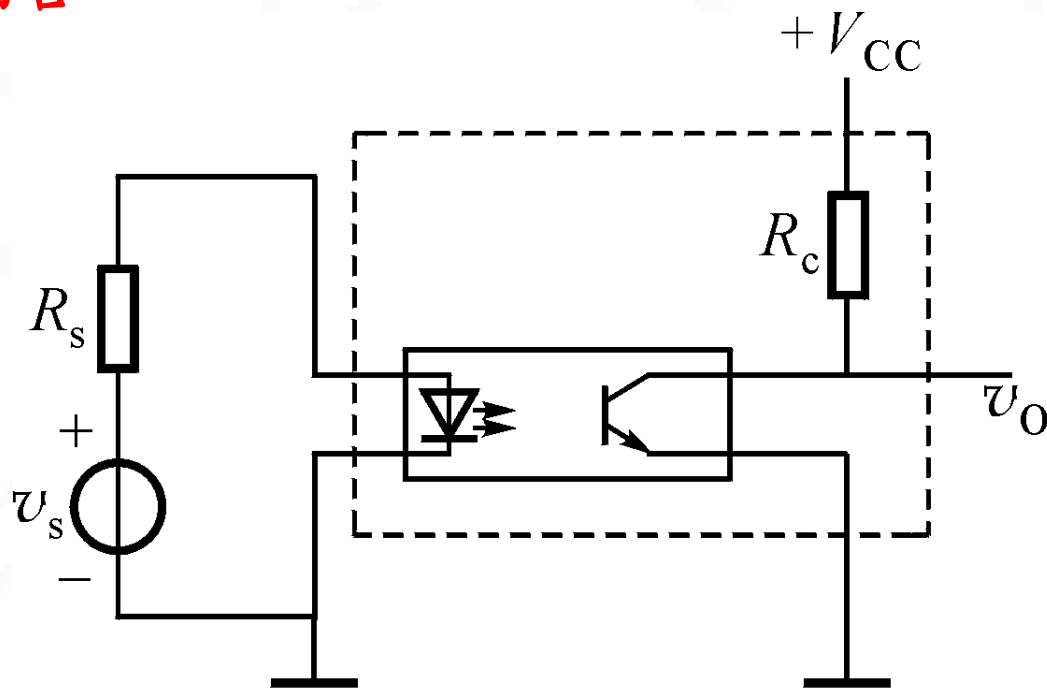


优点是各级静态工作点互不影响，能实现**阻抗变换**。缺点是**频率特性不好**，且非常笨重。





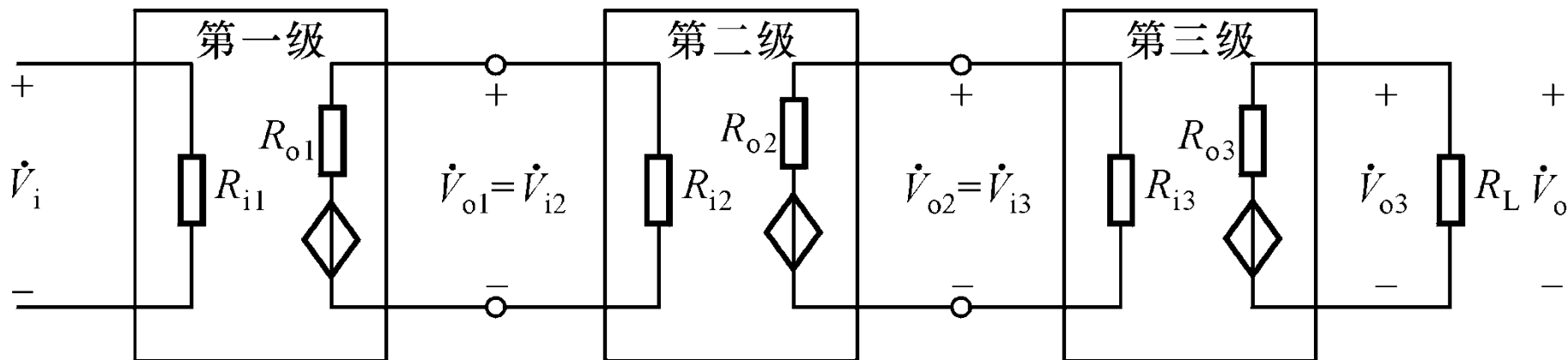
## ◇ 光电耦合



通过“电-光-电”转换实现电信号的传递，因而在电气上实现了隔离，**抗干扰能力强**，数字电路中应用广泛。

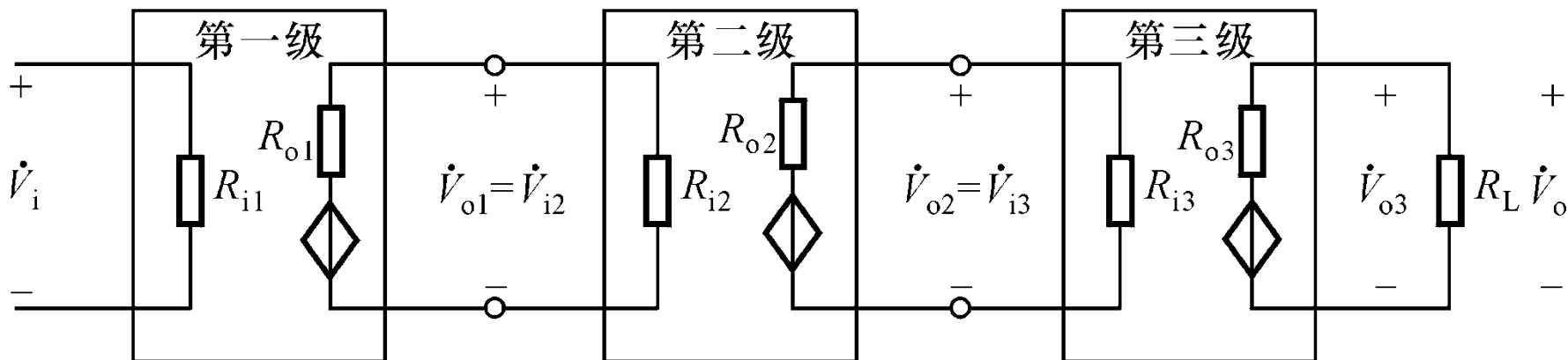


## 二、多级放大电路的分析计算



$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_{o1}} \cdots \frac{\dot{V}_{on}}{\dot{V}_{o(n-1)}} = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdots \dot{A}_{vn} = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{vk}$$

多级放大电路分析的基本原则是：**逐级计算**，**同时考虑负载效应**（后一级放大电路的输入电阻作为前一级放大电路的负载对它的影响）。



$$R_i = R_{i1} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$$

当第一级为**CC**电路时，应考虑第二级输入电阻的影响。

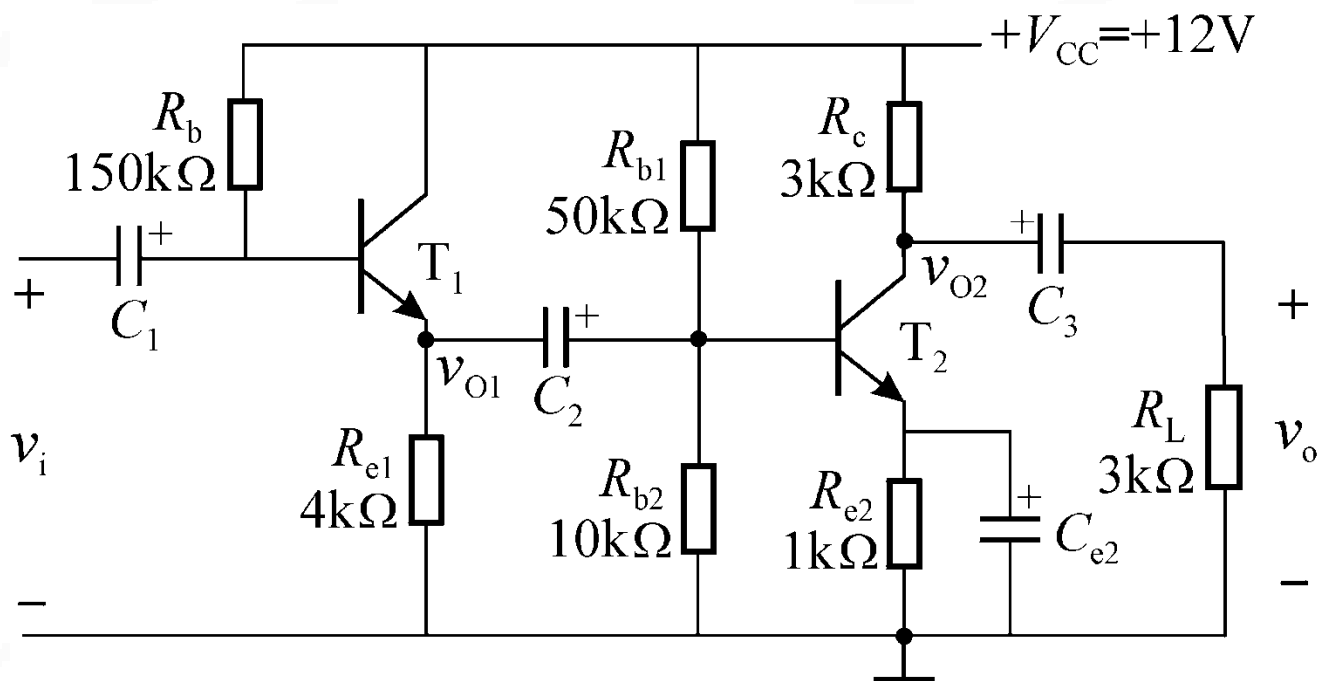
$$R_o = R_{on}$$

当末级电路为**CC**电路时，应考虑末前级输出电阻的影响。

# 【例1】

两级放大电路的参数如图所示，设三极管的 $\beta_1=\beta_2=50$ ， $V_{BE1}=V_{BE2}=0.7V$ ， $r_{bb'}=200\Omega$ ， $r_{ce}$ 可忽略。试求：

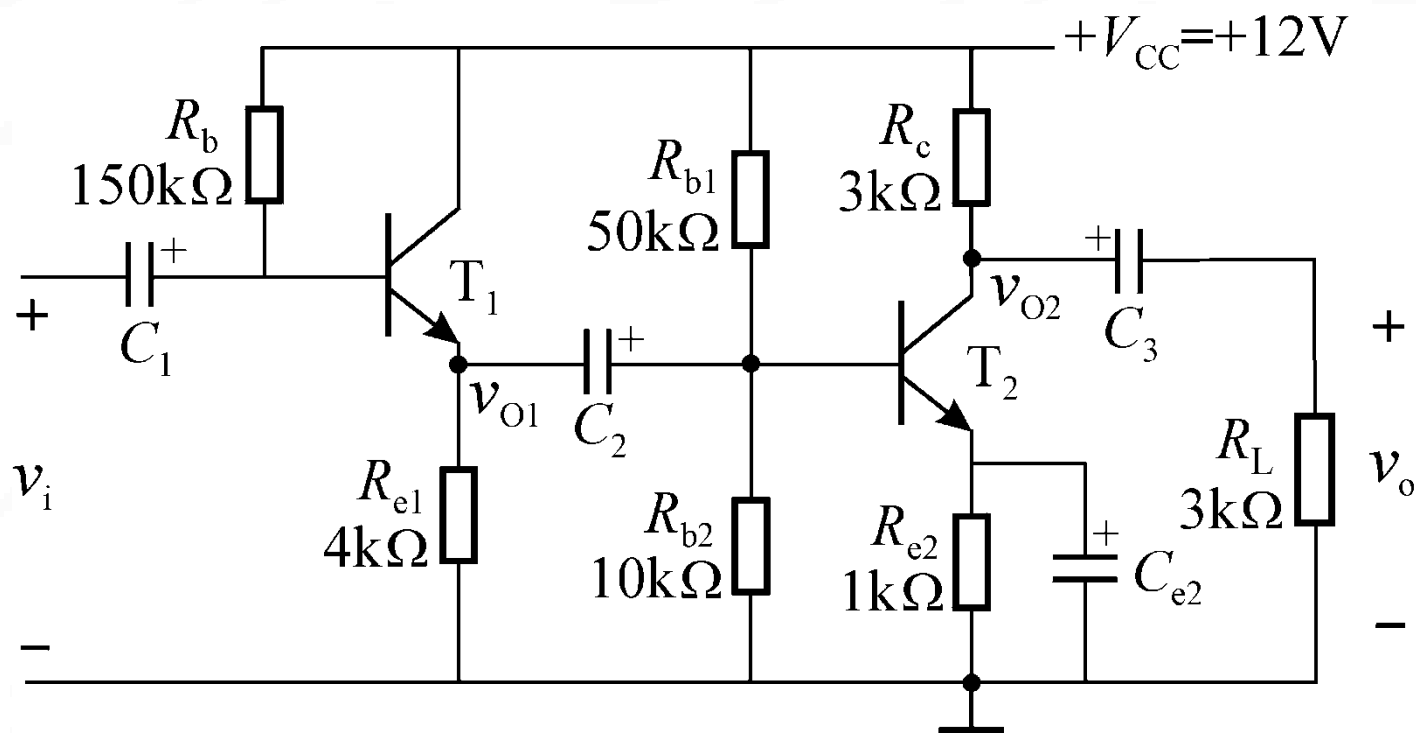
- (1) 电路的静态工作点 $I_{C1Q}$ 、 $V_{CE1Q}$ 、 $I_{C2Q}$ 、 $V_{CE2Q}$ ；
- (2) 画出整个电路在中频段的h参数微变等效电路；
- (3) 整个电路的电压放大倍数 $A_v$ 、 $R_i$ 和 $R_o$ ；
- (4) 整个放大电路的最大不失真输出电压 $V_{om(max)}$ 。



【解】 (1)求静态工作点:

$$I_{C1Q} \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_b}{1 + \beta} + R_{e1}} = \frac{12 - 0.7}{\frac{150}{51} + 4} = 1.63 \text{ mA}$$

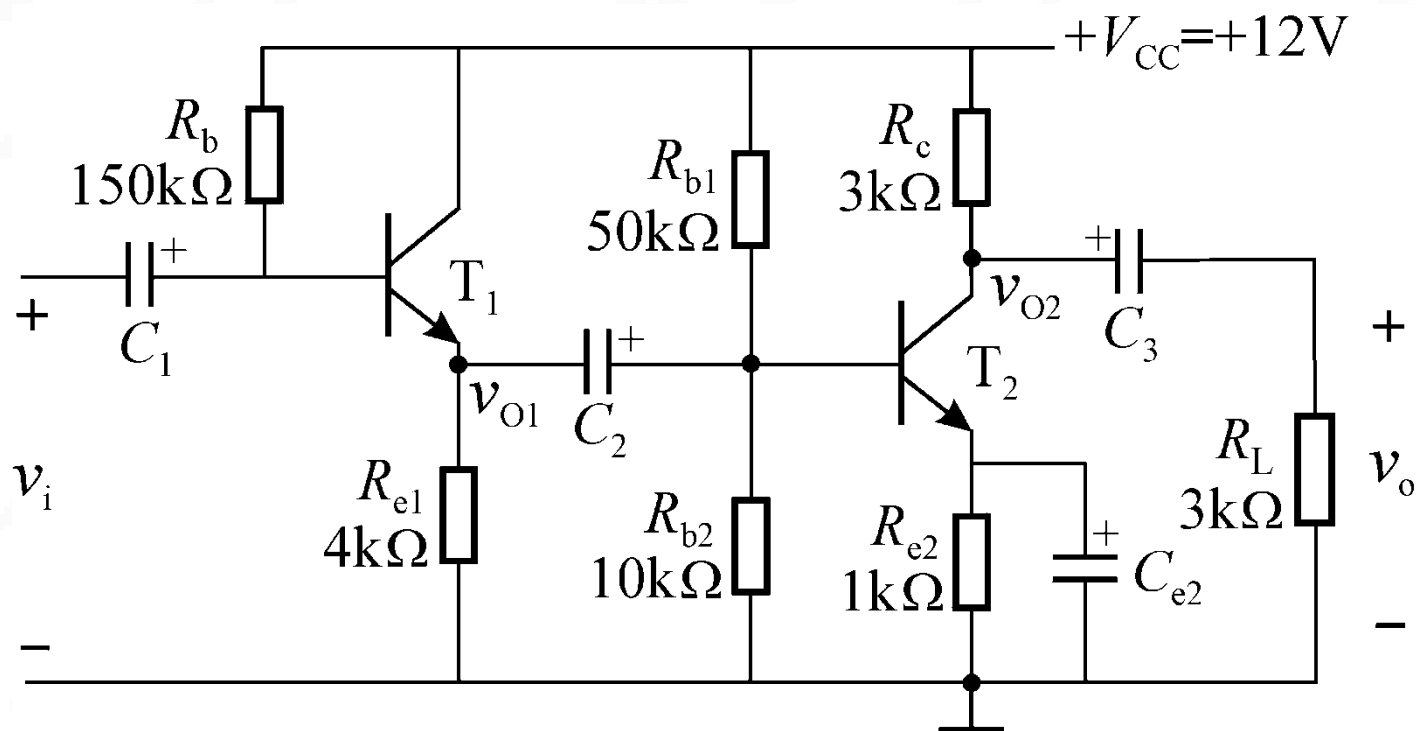
$$V_{CE1Q} = V_{CC} - I_{E1Q} R_{e1} = 12 - 1.63 \times 4 = 5.48 \text{ V}$$



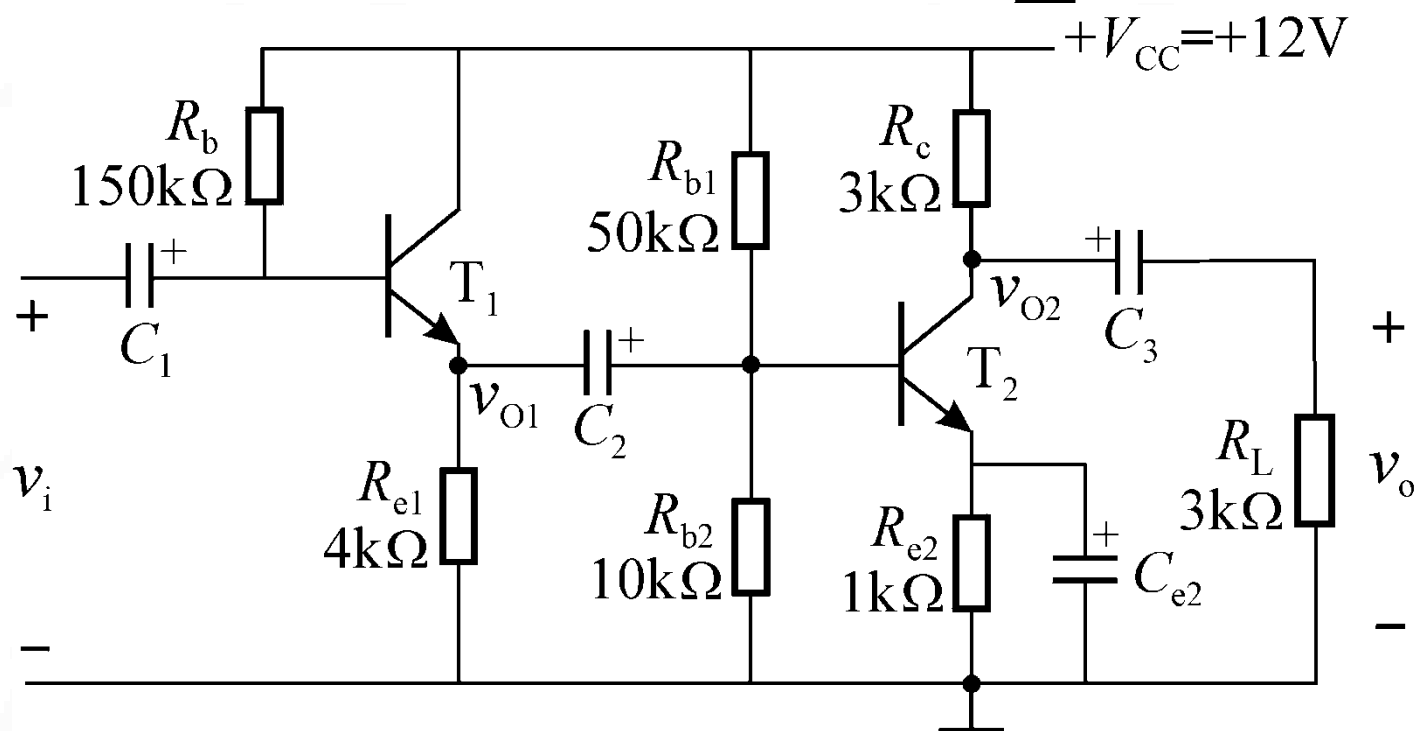
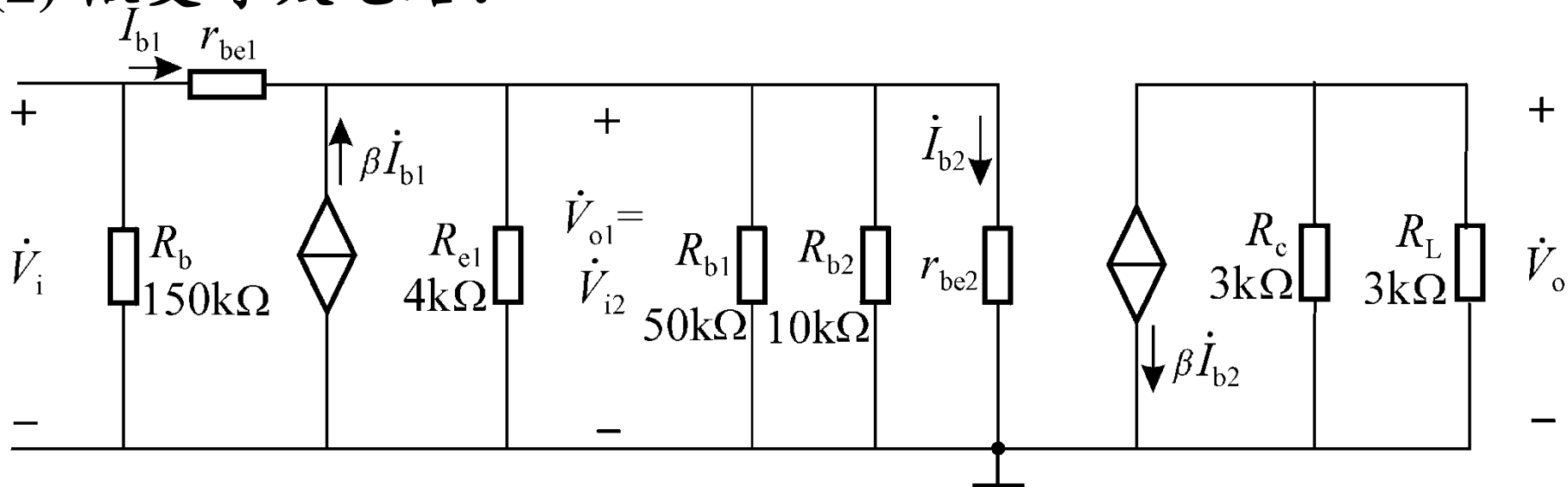


$$I_{C2Q} \approx \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_{b1} // R_{b2}}{1 + \beta} + R_{e2}} = \frac{\frac{10}{50 + 10} \times 12 - 0.7}{\frac{50 // 10}{51} + 1} = 1.12 \text{ mA}$$

$$V_{CE2Q} = V_{CC} - I_{C2Q} (R_c + R_{e2}) = 12 - 1.12 \times 4 = 7.52 \text{ V}$$



## (2) 微变等效电路:

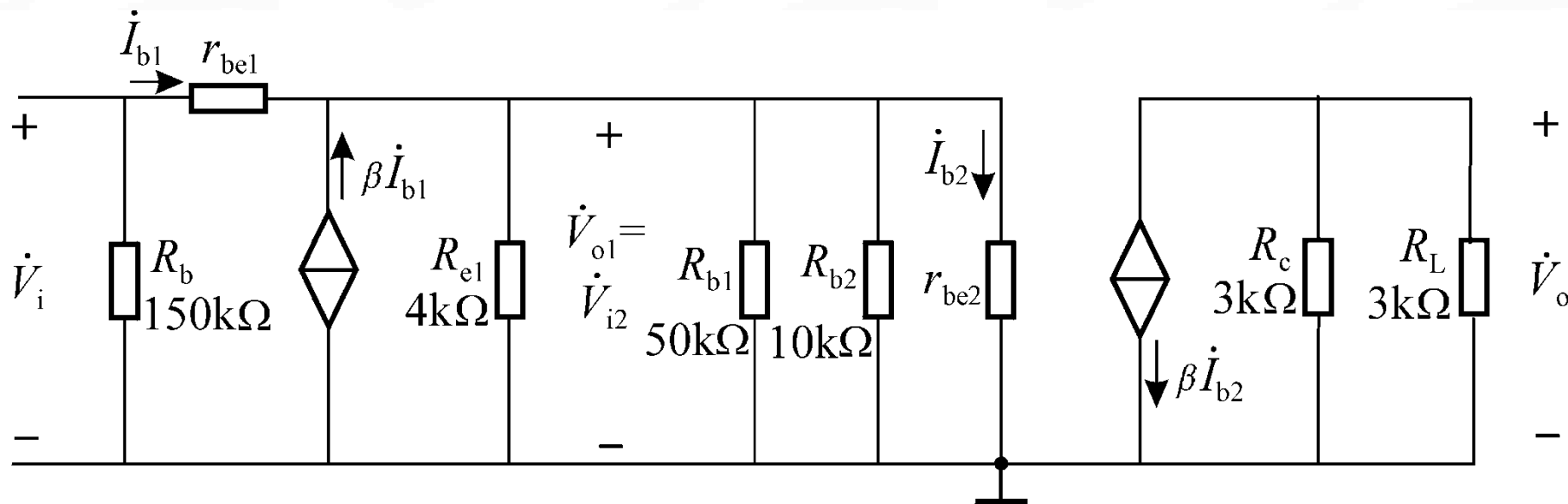


(3) 求  $A_v$ 、 $R_i$  和  $R_o$  :

$$r_{be1} = 200 + 51 \times \frac{26}{1.63} = 1.0 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = 200 + 51 \times \frac{26}{1.12} = 1.4 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_{v1} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} = \frac{(1 + \beta)(R_{e1} // R_{i2})}{r_{be1} + (1 + \beta)(R_{e1} // R_{i2})} = \frac{51 \times (4 // 50 // 10 // 1.4)}{1.0 + 51 \times (4 // 50 // 10 // 1.4)} = 0.98$$





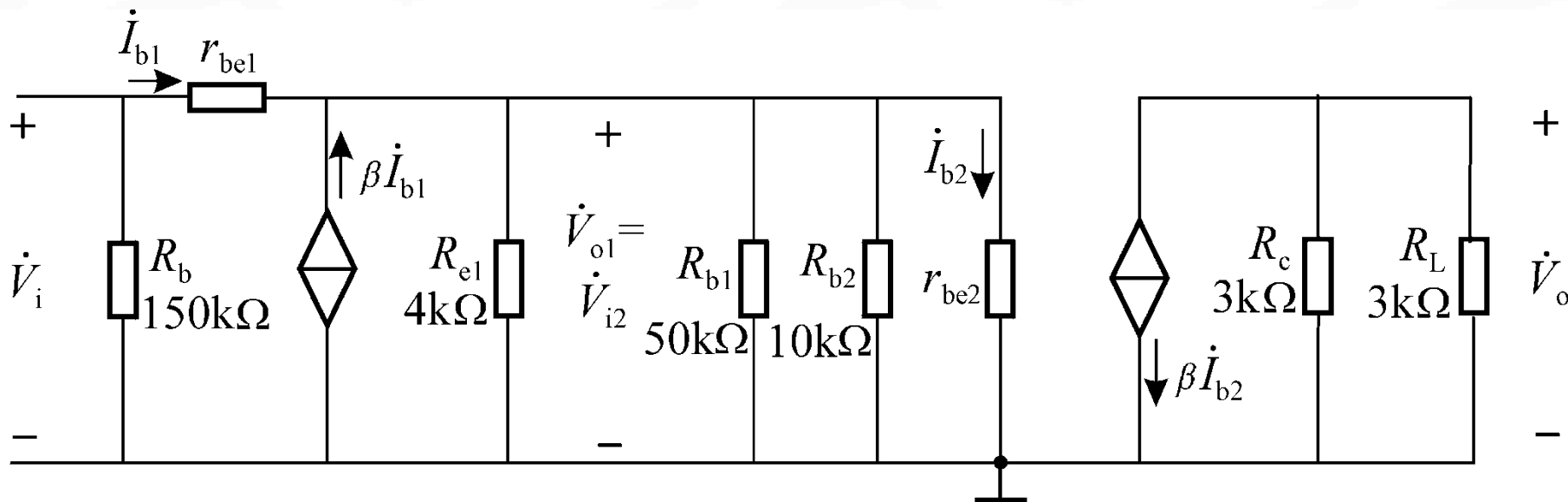
$$\dot{A}_{v2} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{i2}} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be2}} = -\frac{50 \times 1.5}{1.4} = -53.6$$

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} = -52.5$$

$$R_i = R_b // [r_{be1} + (1 + \beta)(R_{e1} // R_{b1} // R_{b2} // r_{be2})]$$

$$= 150 // [1.0 + 51 \times (4 // 50 // 10 // 1.4)] = 36.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_c = 3 \text{ k}\Omega$$



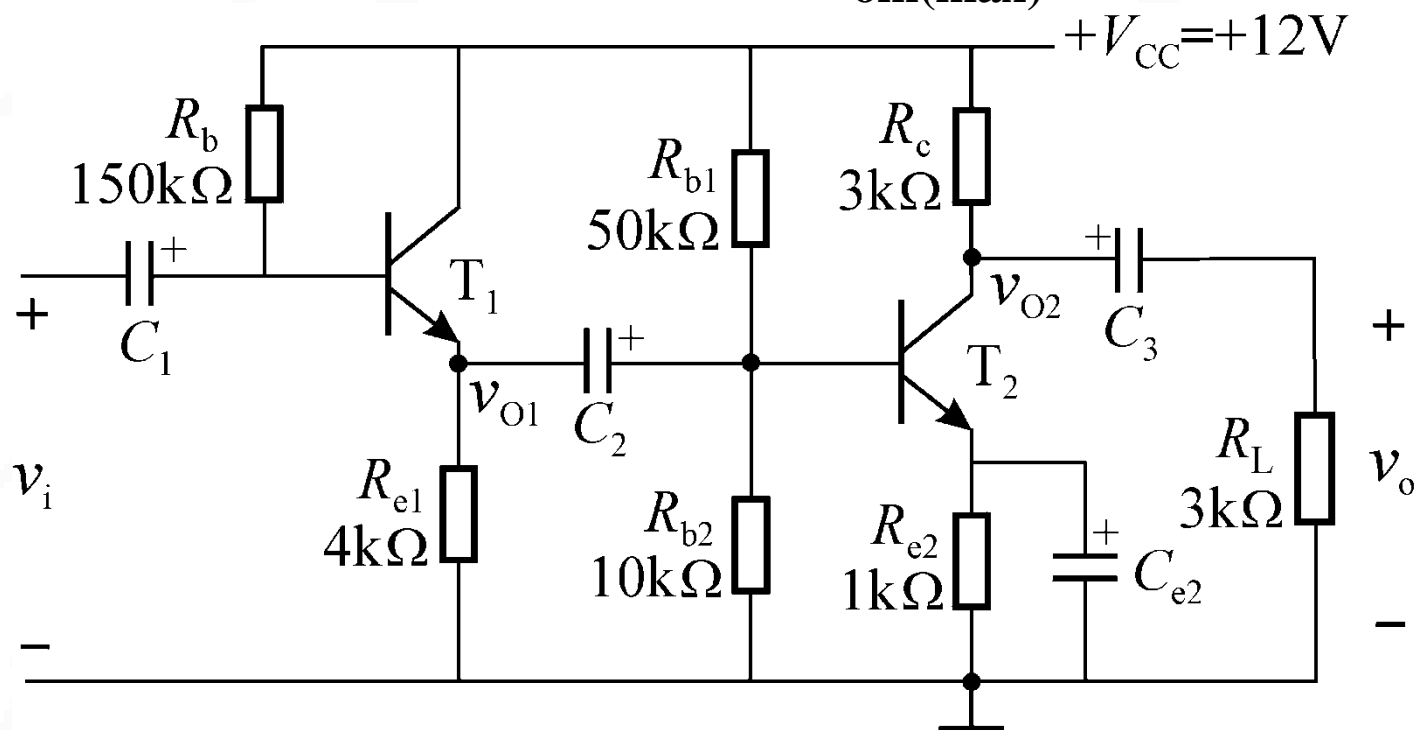
#### (4) 最大不失真输出电压 $V_{om(max)}$ :

由于第二级为CE放大，因此整个电路的最大不失真输出由第二级决定。

$$V_{om}^+ = I_{C2Q}(R_c // R_L) = 1.12 \times 1.5 = 1.68 \text{ V}$$

$$V_{om}^- = V_{CE2Q} - V_{CES} = 7.52 - 0.7 = 6.82 \text{ V}$$

所以，最大不失真输出电压  $V_{om(max)} = 1.68 \text{ V}$  (截止失真)。



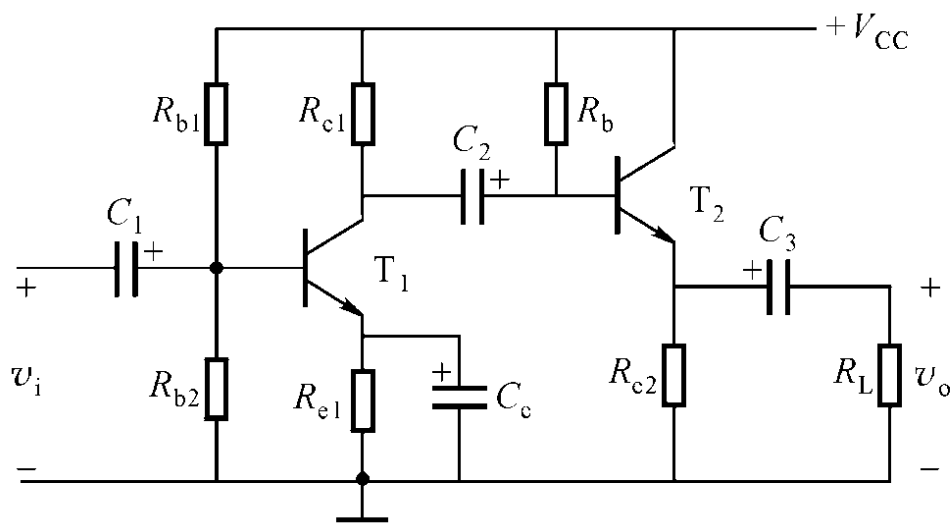


## 【例2】

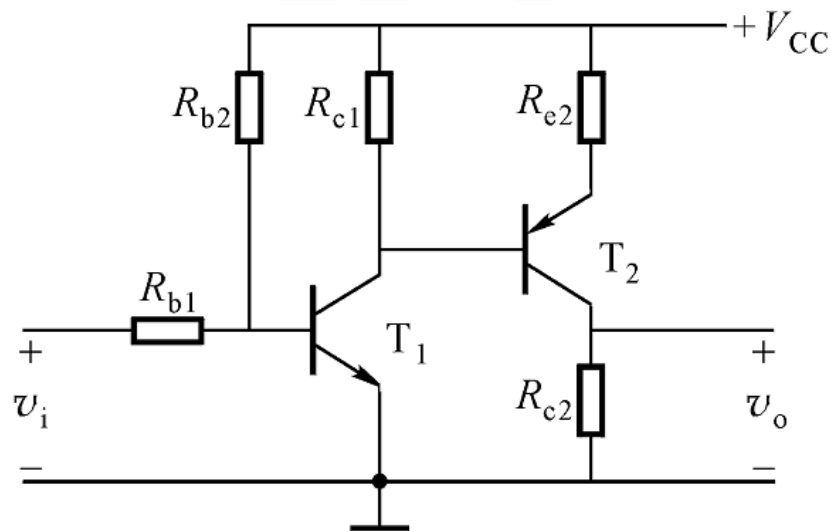
不同耦合方式的多级放大电路如图所示。

(1) 分别画出交流通路，并指出组态；

(2) 写出它们的 $A_v$ 、 $R_i$ 和 $R_o$ 的表达式。



(a) 阻容耦合



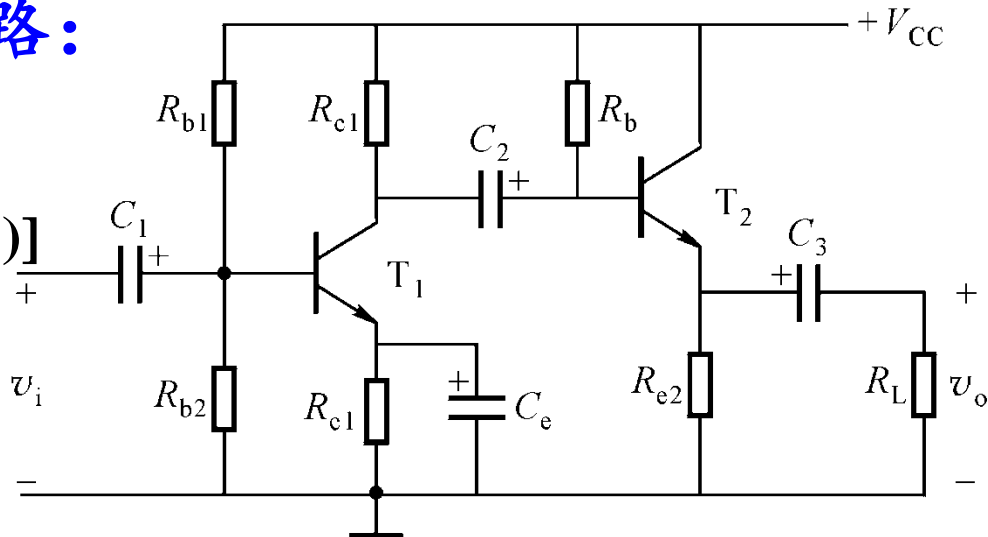
(b) 直接耦合

【解】 图(a)阻容耦合电路：

$$R_{i1} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be1}$$

$$R_{i2} = R_b // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)]$$

$$\dot{A}_{v1} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta_1 (R_{c1} // R_{i2})}{r_{be1}}$$



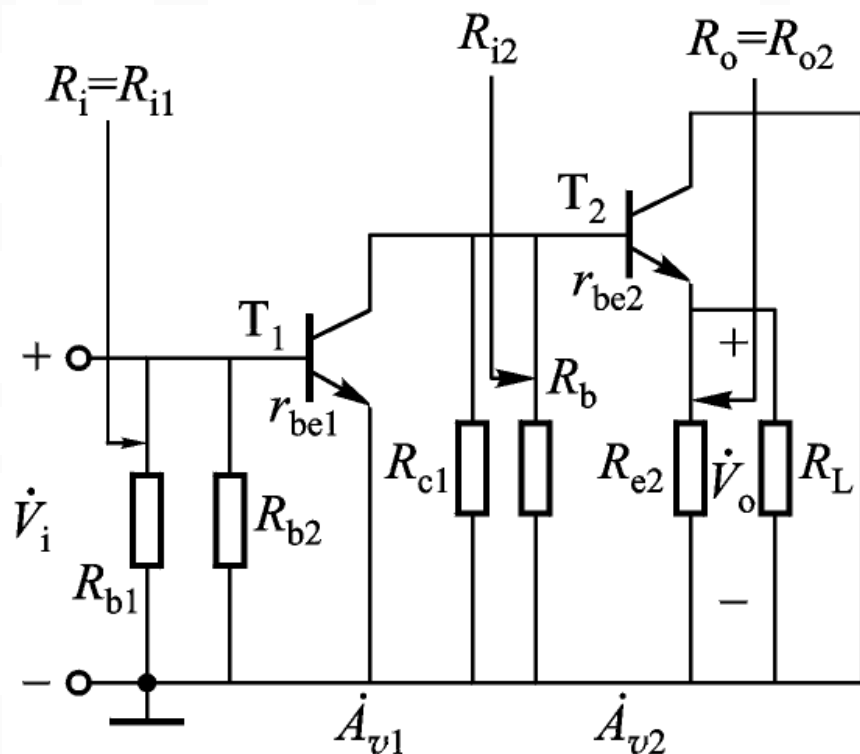
**T<sub>1</sub>:CE**

**T<sub>2</sub>:CC**

$$\dot{A}_{v2} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}} = \frac{(1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)}$$

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \quad R_i = R_{i1}$$

$$R_o = R_{o2} = R_{e2} // \frac{r_{be2} + R_b // R_{c1}}{1 + \beta_2}$$

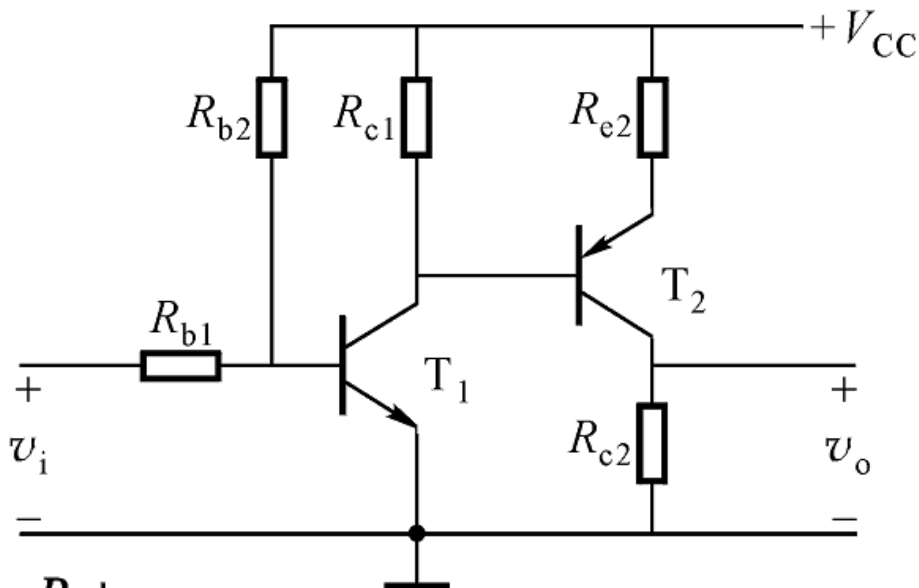


## 图(b) 直接耦合电路:

$$R_{i1} = R_{b1} + (R_{b2} \parallel r_{be1})$$

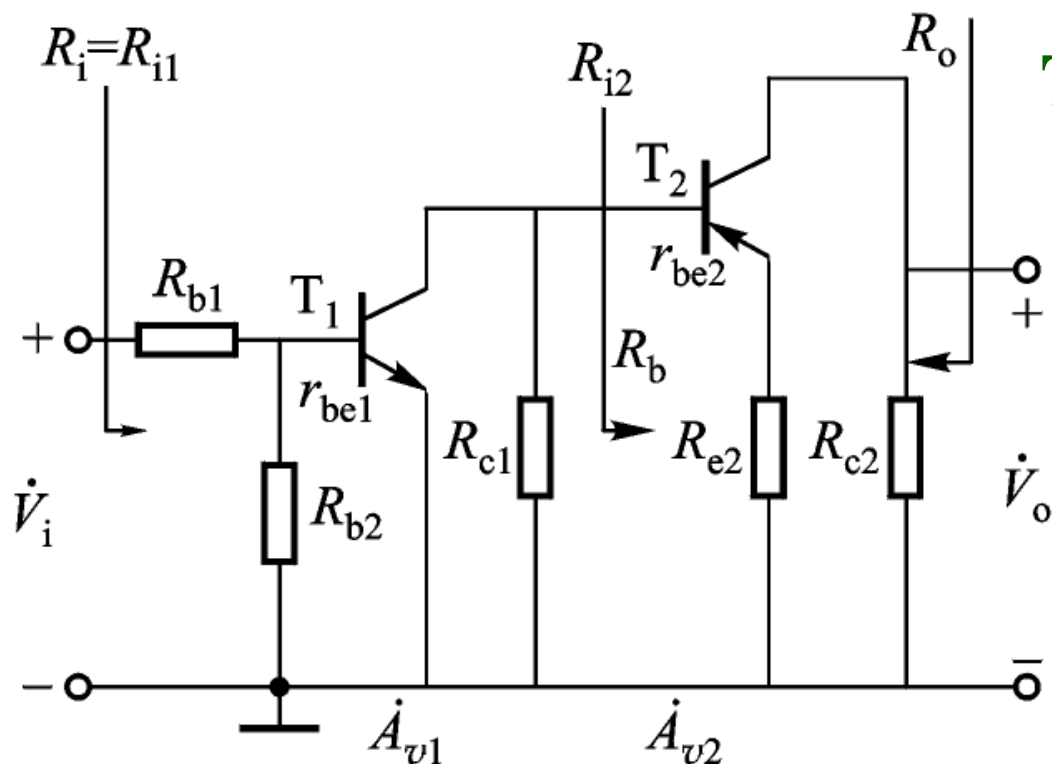
$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}$$

$$\dot{A}_{v1} = \frac{-\beta_1 (R_{c1} \parallel R_{i2})}{r_{be1}} \cdot \frac{R_{b2} \parallel r_{be1}}{R_{b1} + R_{b2} \parallel r_{be1}}$$



**T<sub>1</sub>:CE**

**T<sub>2</sub>:CE**



$$\dot{A}_{v2} = \frac{-\beta_2 R_{c2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}}$$

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2}$$

$$R_i = R_{i1}$$

$$R_o = R_{o2} = R_{c2}$$



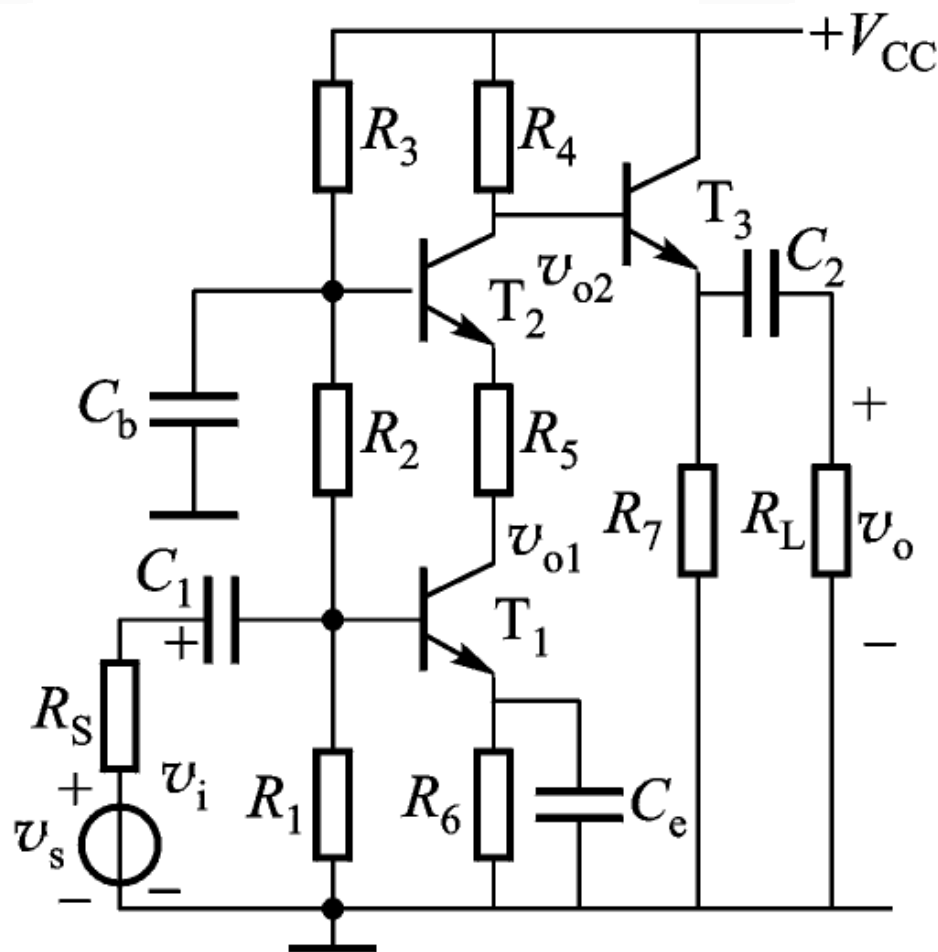
### 【例3】

对于图示多级放大电路。

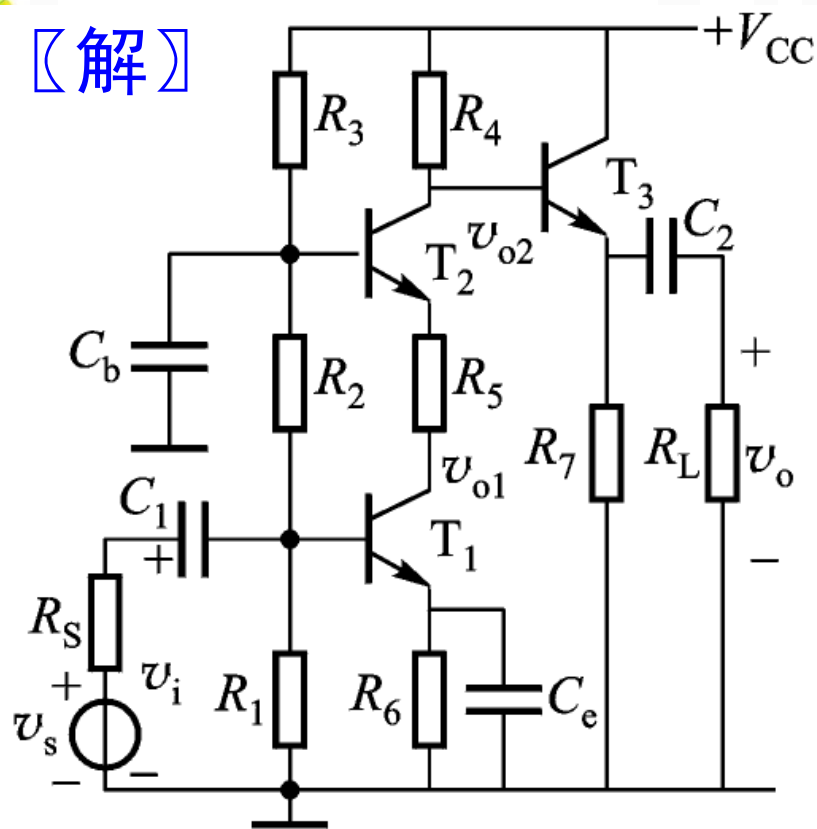
(1) 画出交流通路，

指出组态；

(2) 分析输出电压与  
输入电压之间的  
相位关系。



【解】



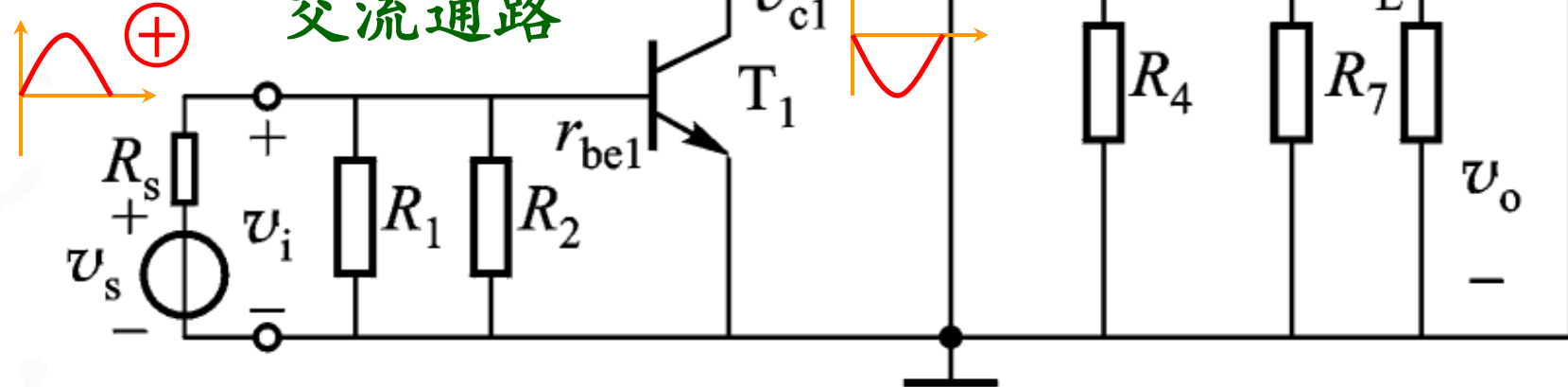
$T_1$ :CE 反相

$T_2$ :CB 同相

$T_3$ :CC 同相

所以,  $v_o$  与  $v_i$  为反相

交流通路





## 1.5 放大电路的频率特性分析

- ✧ 频率响应是放大电路对不同频率正弦输入信号的稳态响应。
- ✧ 在前面的讨论中，为了简化问题，都假定放大电路的输入信号频率不太高、也不太低，或者说工作在**中频段**，忽略了所有电容的影响。
- ✧ 耦合电容和旁路电容，容量很大（ $\mu\text{F}$ 级），但当频率很低时，容抗不能忽略。
- ✧ 晶体管的结电容和极间电容，容量很小（ $\text{pF}$ 级），但当频率很高时，容抗也不能忽略。
- ✧ 本节讨论这些电容对放大电路性能的影响。





## 一、利用波特图分析放大电路的频率特性

✧ 在工程分析中，通常用波特图来分析频率特性：

- 横坐标采用对数频率刻度；
- 对数幅频特性纵坐标用分贝表示；
- 对数相频特性纵坐标表示相角  $\varphi$ 。
- 用渐近折线代替绘制十分麻烦的曲线。

✧ 波特图的好处：

- 将很宽的频率变化范围压缩在较窄的频率坐标内；
- 将增益的乘、除运算变成了坐标的加、减运算。

# 1、低频段波特图的绘制

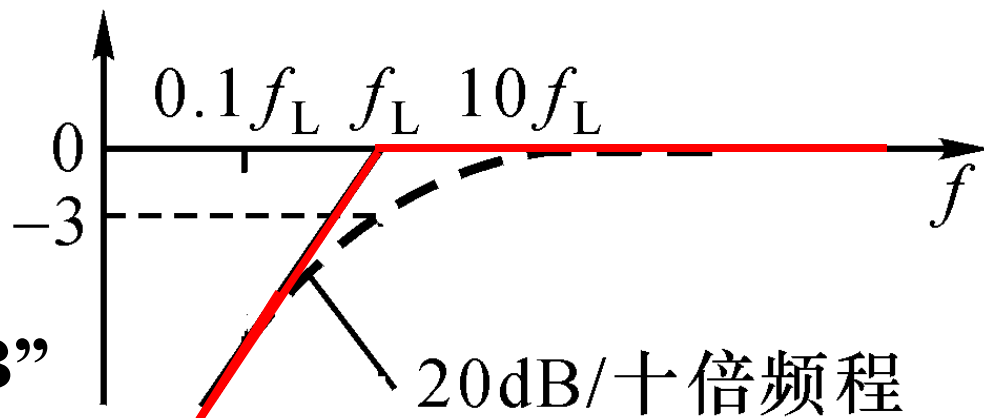
频率特性表达式:  $\dot{A}_v = \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$

对数幅频特性表达式:  $20\lg|\dot{A}_v| = 20\lg\frac{f}{f_L} - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_L}\right)^2}$

✧ 逐点描出可得实际曲线，但不方便。 $20\lg|\dot{A}_v|/\text{dB}$

✧ 当  $f \gg f_L$  时，为 0dB 的直线。

✧ 当  $f \ll f_L$  时，为“每十倍频增益增大 20dB”的直线。



✧ 用这两条折线代替实际曲线，最大误差为 3dB (在  $f=f_L$  处)。

✧ 由于频率  $f_L$  在发生转折， $f_L$  称为 **转折频率**。

频率特性表达式:  $\dot{A}_v = \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$

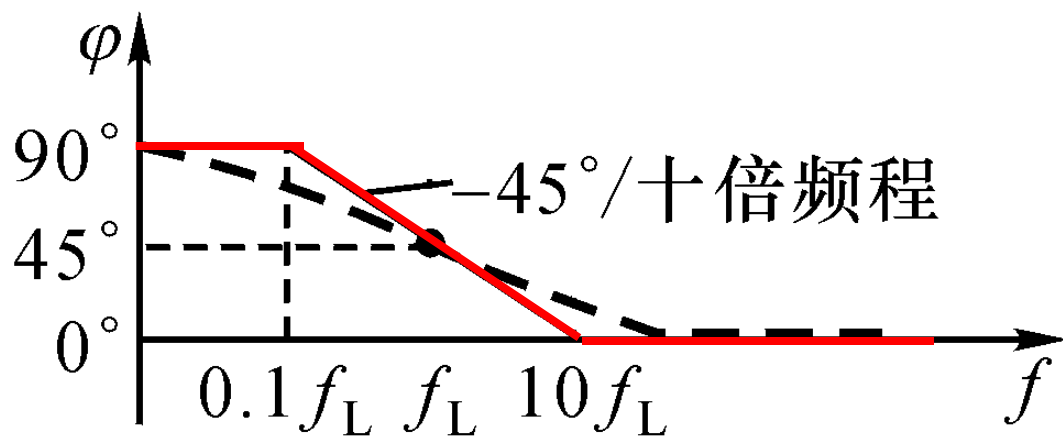
对数相频特性表达式:  $\varphi = 90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L}$

✧ 逐点描出可得实际曲线, 但不方便。

✧ 当  $f > 10f_L$  时,  
 $\varphi \approx 0^\circ$

✧ 当  $f < 0.1f_L$  时,  
 $\varphi \approx 90^\circ$

✧ 在  $0.1f_L \sim 10f_L$  时, 用折线代替, 斜率为“每十倍频下降  $45^\circ$ ”。



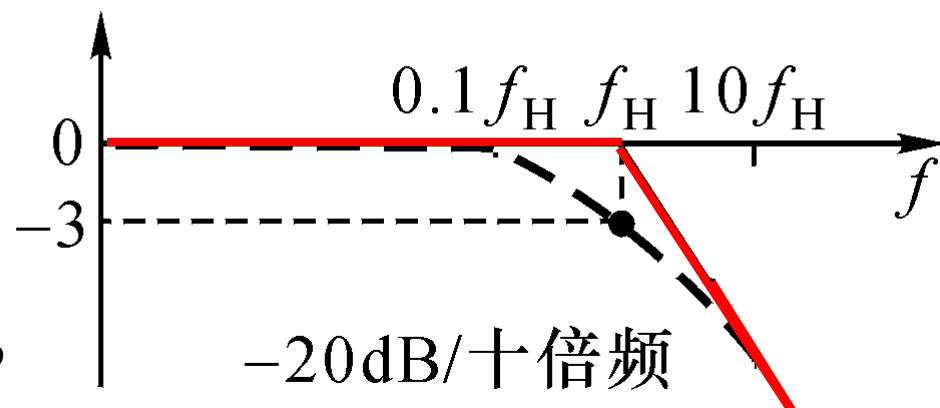
✧ 最大误差在  $f = 0.1f_L$  处 (误差为  $+5.71^\circ$ ) 及在  $f = 10f_L$  处 (误差为  $-5.71^\circ$ )。

## 2、高频段波特图的绘制

频率特性表达式： $\dot{A}_v = \frac{1}{1 + jf / f_H}$

对数幅频特性表达式： $20\lg|\dot{A}_v| = -20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}$

$20\lg|\dot{A}_v|/\text{dB}$



✧ 同样采用折线化方法来近似。

✧ 当  $f \ll f_H$  时，为 0dB 的直线。

✧ 当  $f \gg f_H$  时，为“每十倍频增益下降 20dB”的直线。

✧ 用这两条折线代替实际曲线，最大误差为 3dB (在  $f=f_H$  处)。

✧ 频率  $f_H$  在发生转折，因此  $f_H$  也称为 **转折频率**。

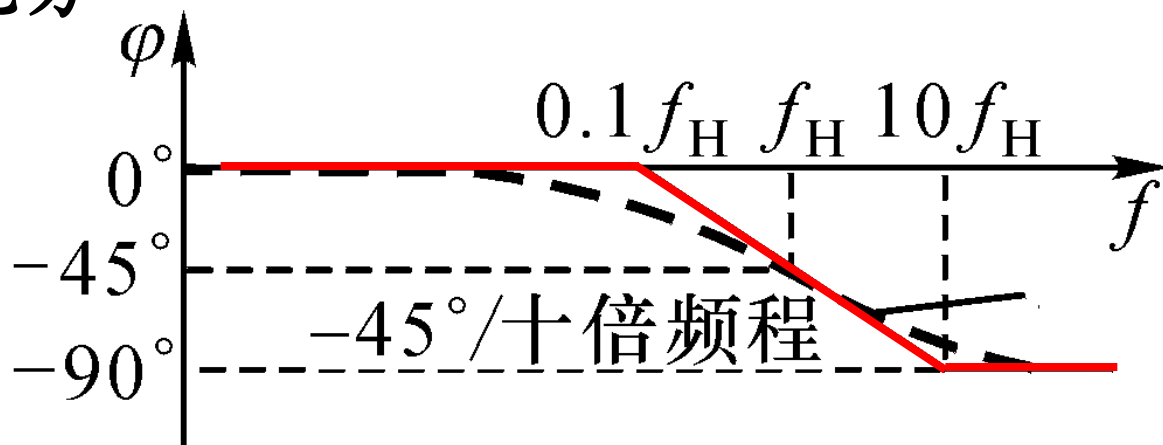
频率特性表达式:  $\dot{A}_v = \frac{1}{1 + jf / f_H}$

对数相频特性表达式:  $\varphi = -\arctan \frac{f}{f_H}$

✧ 同样采用折线化方法来近似。

✧ 当  $f > 10f_H$  时,  
 $\varphi \approx -90^\circ$

✧ 当  $f < 0.1f_H$  时,  
 $\varphi \approx 0^\circ$

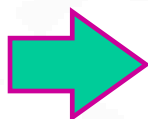
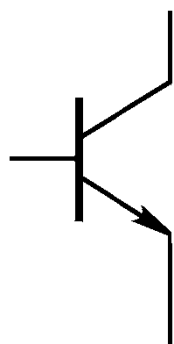


✧ 在  $0.1f_H \sim 10f_H$  时, 用折线代替, 斜率为“每十倍频下降  $45^\circ$ ”。

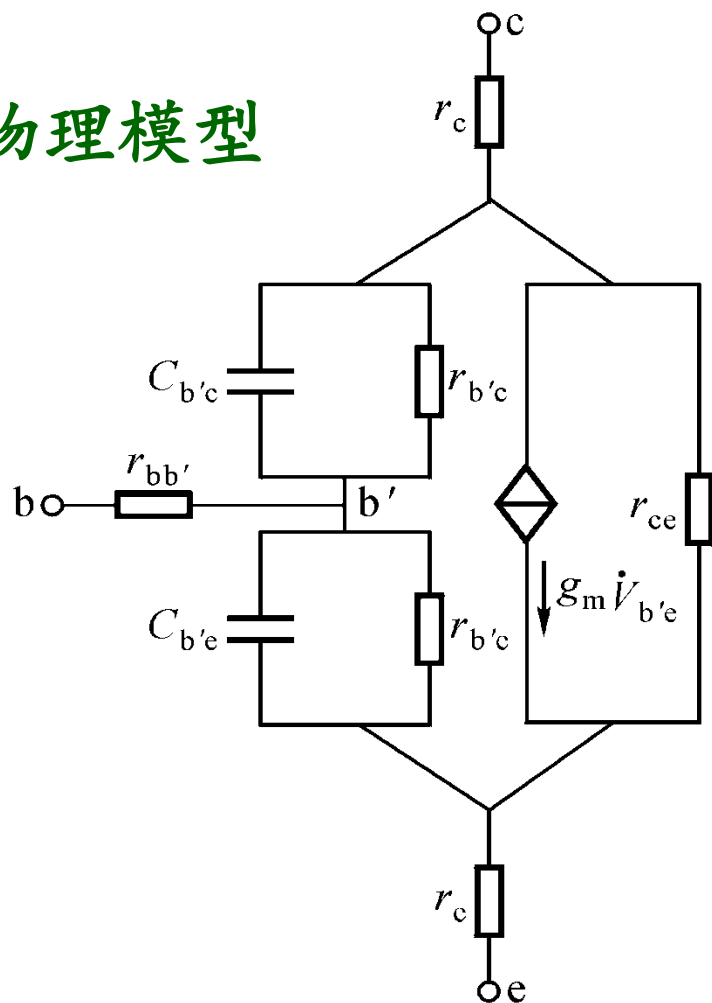
✧ 最大误差在  $f = 0.1f_H$  处 (误差为  $+5.71^\circ$ ) 及在  $f = 10f_H$  处 (误差为  $-5.71^\circ$ )。

## 二、三极管和场效应管的高频小信号模型

### 1、三极管的高频小信号模型



物理模型



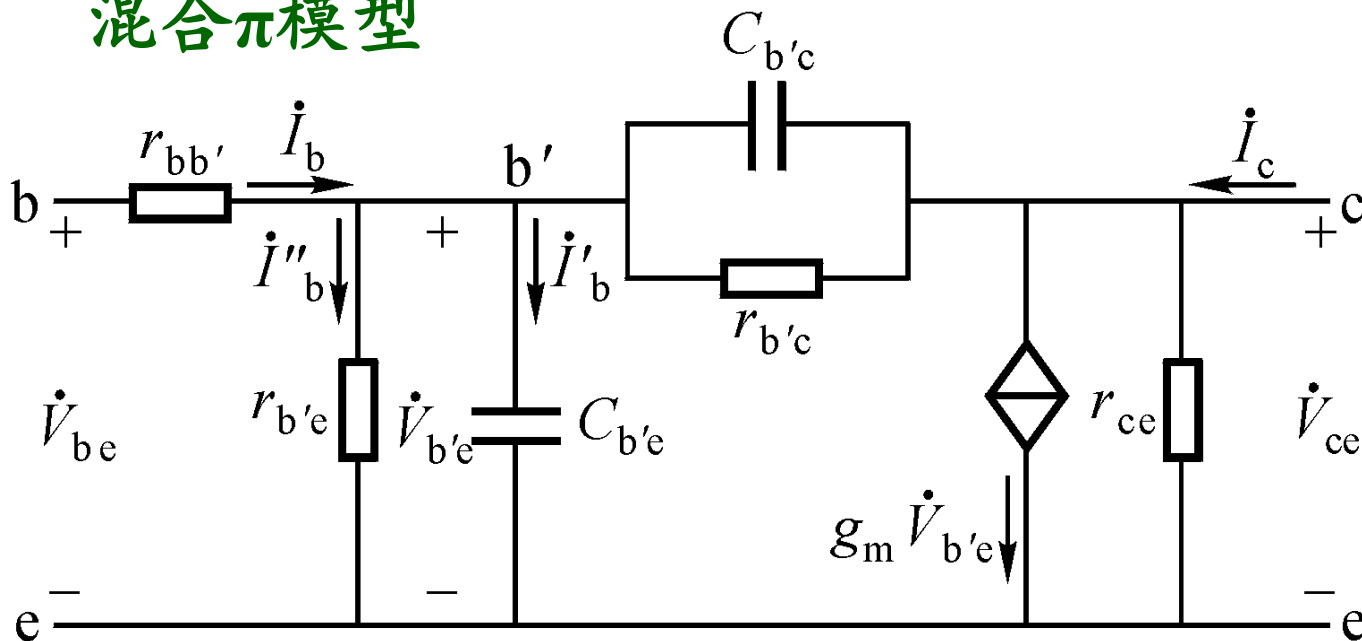
忽略  $r_c$ 、 $r_e$



发射结正偏，结电容由扩散电容决定(达100pF左右)；集电结反偏，结电容由势垒电容决定(几个pF)。



## 混合 $\pi$ 模型



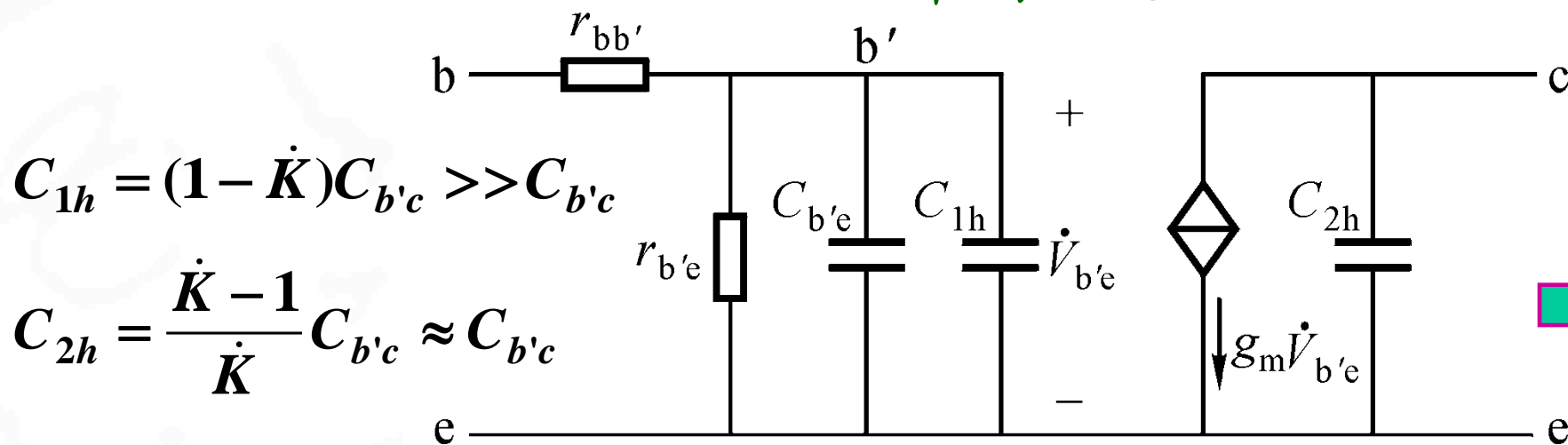
忽略  $r_{b'c}$ 、 $r_{ce}$

$i_b'$  对集电极电流没有贡献；  
 $i_b''$  才能影响集电极电流的大小。

$$g_m \dot{V}_{b'e} = \beta_0 i_b'' = \beta_0 \frac{\dot{V}_{b'e}}{r_{b'e}} \quad g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}}$$



## 单向化处理

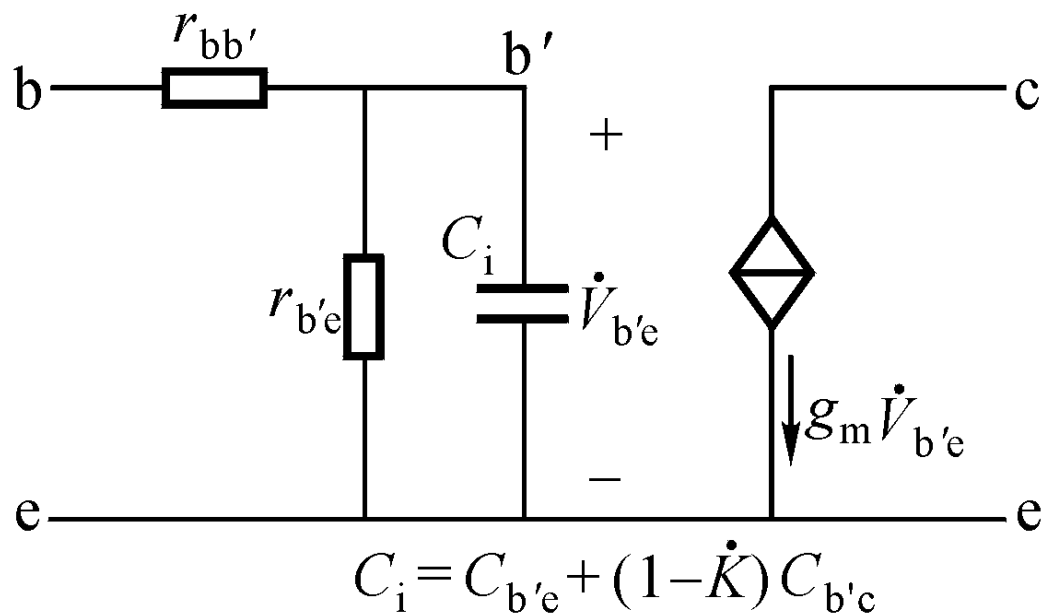


$$C_{1h} = (1 - \dot{K})C_{b'c} \gg C_{b'c}$$

$$C_{2h} = \frac{\dot{K} - 1}{\dot{K}} C_{b'c} \approx C_{b'c}$$



## 高频小信号模型

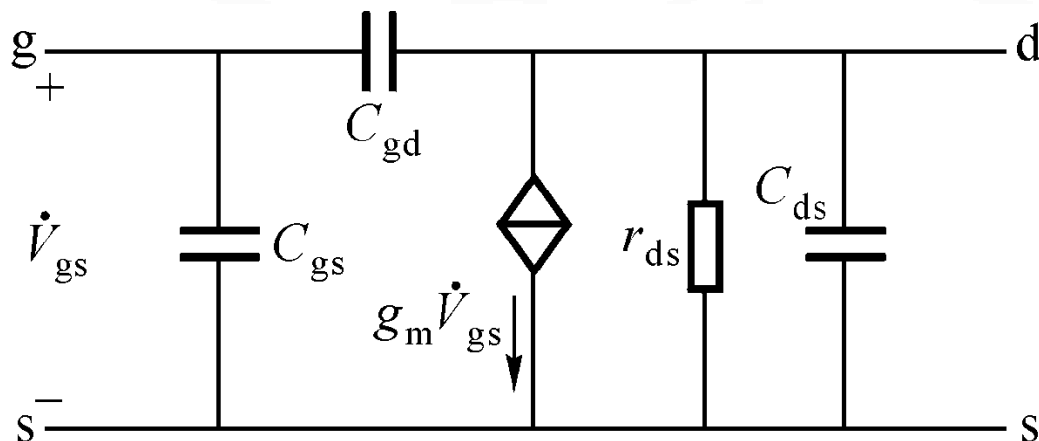


输出回路中的等效电容 $C_{2h}$ 容量很小，可忽略。

$C_i$ 数值可通过查手册经换算得到。

高频小信号模型与低频小信号模型有什么关系？

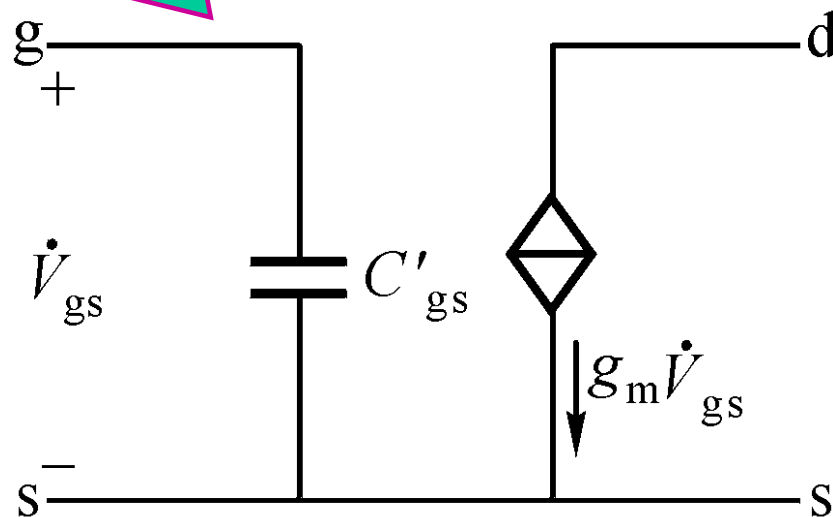
## 2、场效应管的高频小信号模型



高频等效模型

单向化  
简化

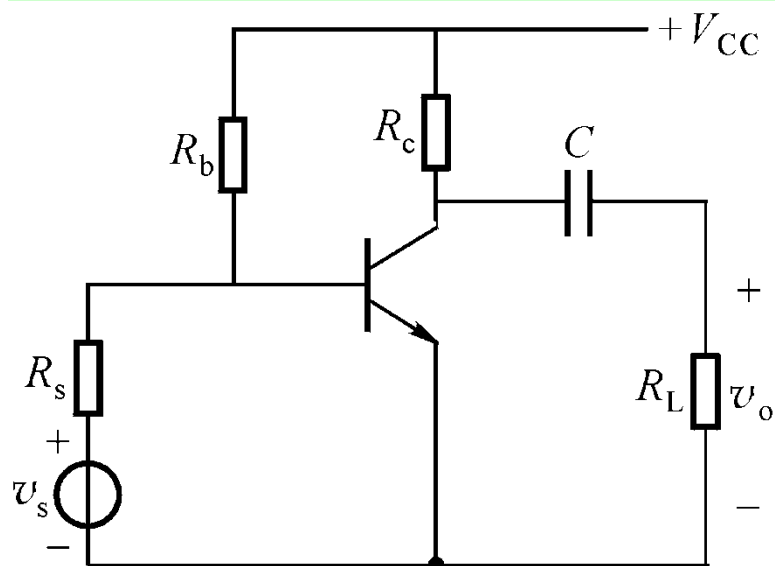
简化模型



$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 - \dot{K})C_{gd}$$

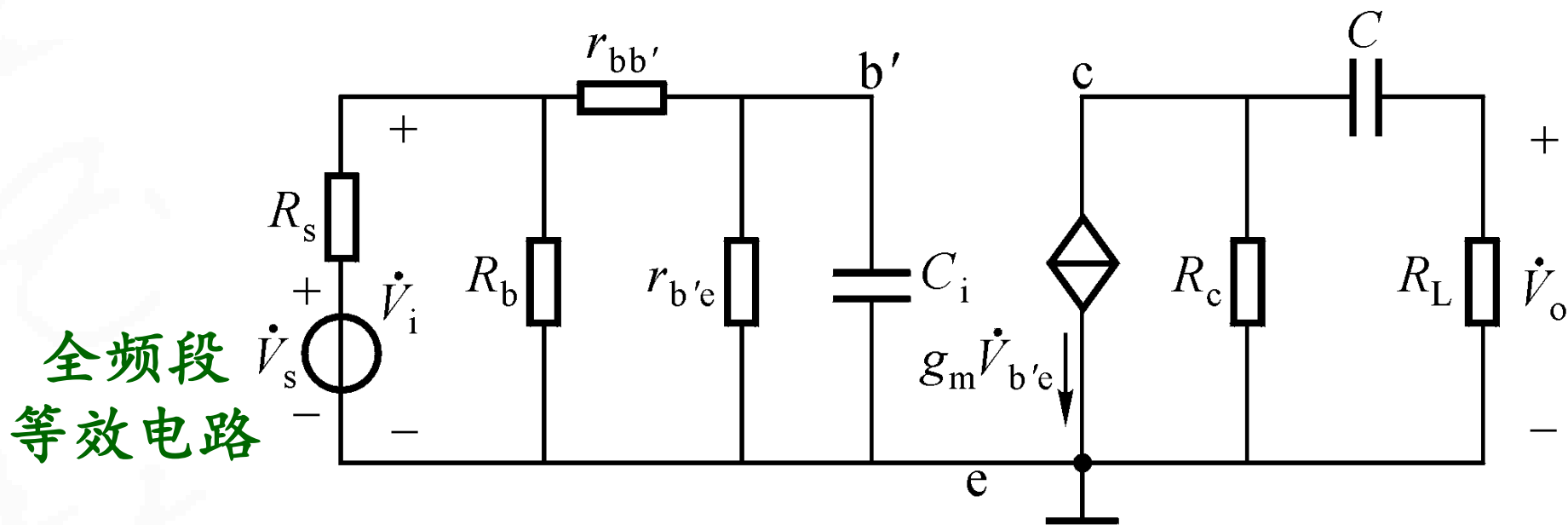


### 三、放大电路的分频段分析法



$C$  通常为  $10 \sim 100 \mu\text{F}$

$C_i$  通常为  $10 \sim 100 \text{pF}$

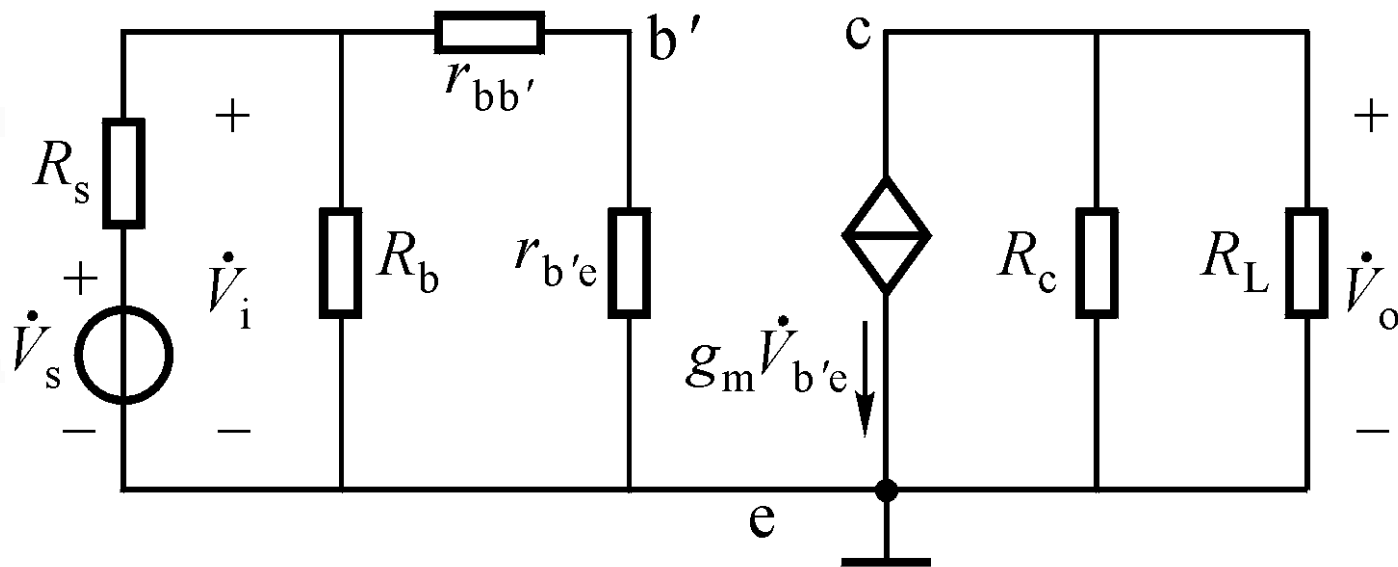
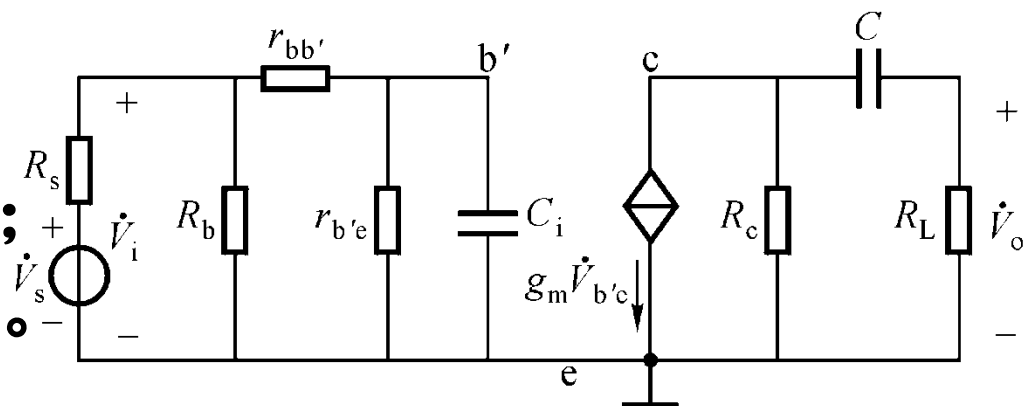


## 分频段分析法

### 中频段:

$C$  容抗很小,交流短路;

$C_i$  容抗很大,交流开路。



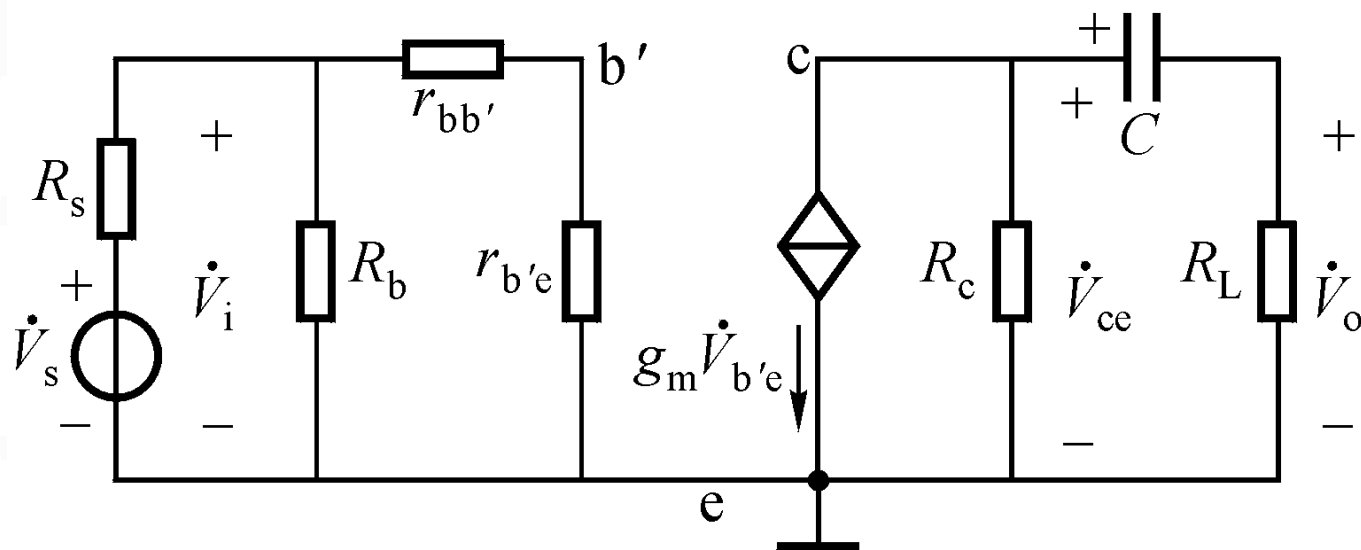
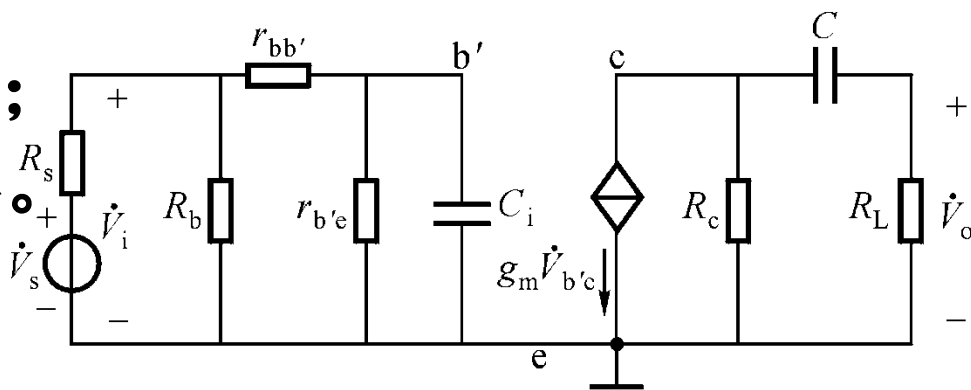
中频段等效电路



## ☆ 低频段:

$C$  容抗增大, 不能忽略;

$C_i$  容抗更大, 交流开路

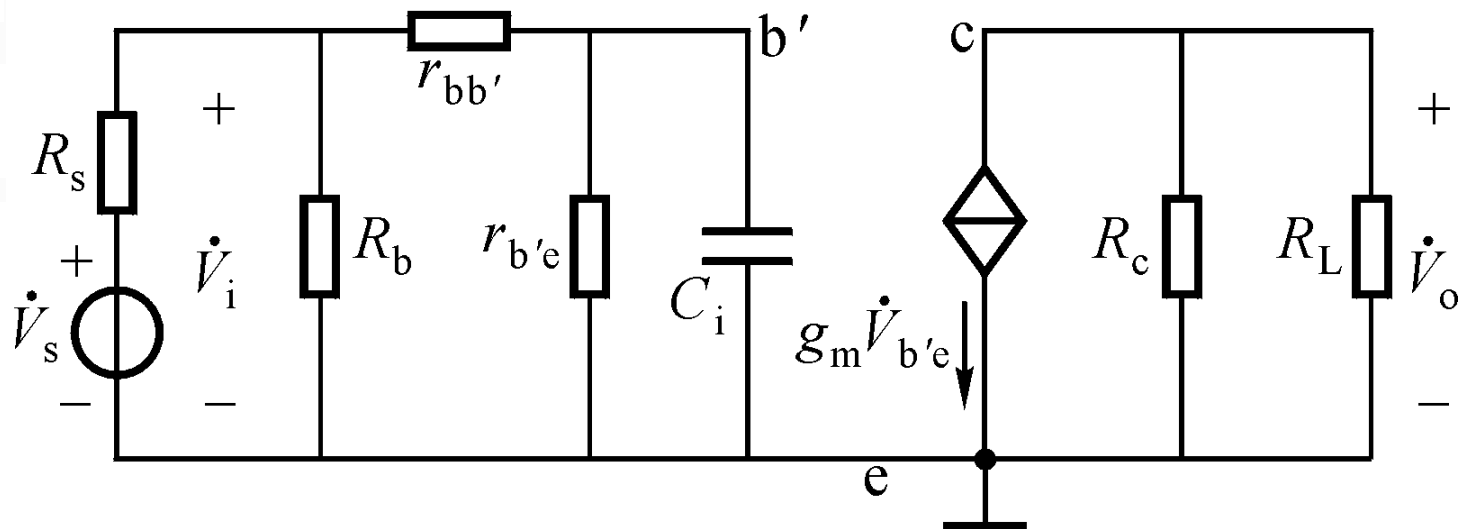
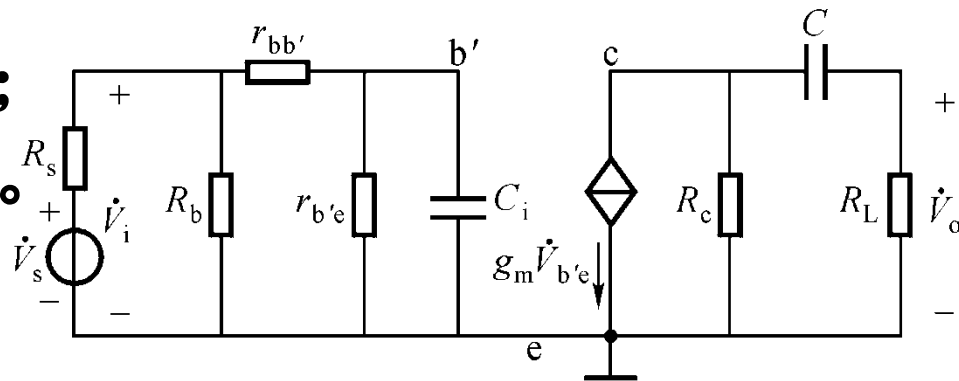


低频段等效电路

# ✧ 高频段:

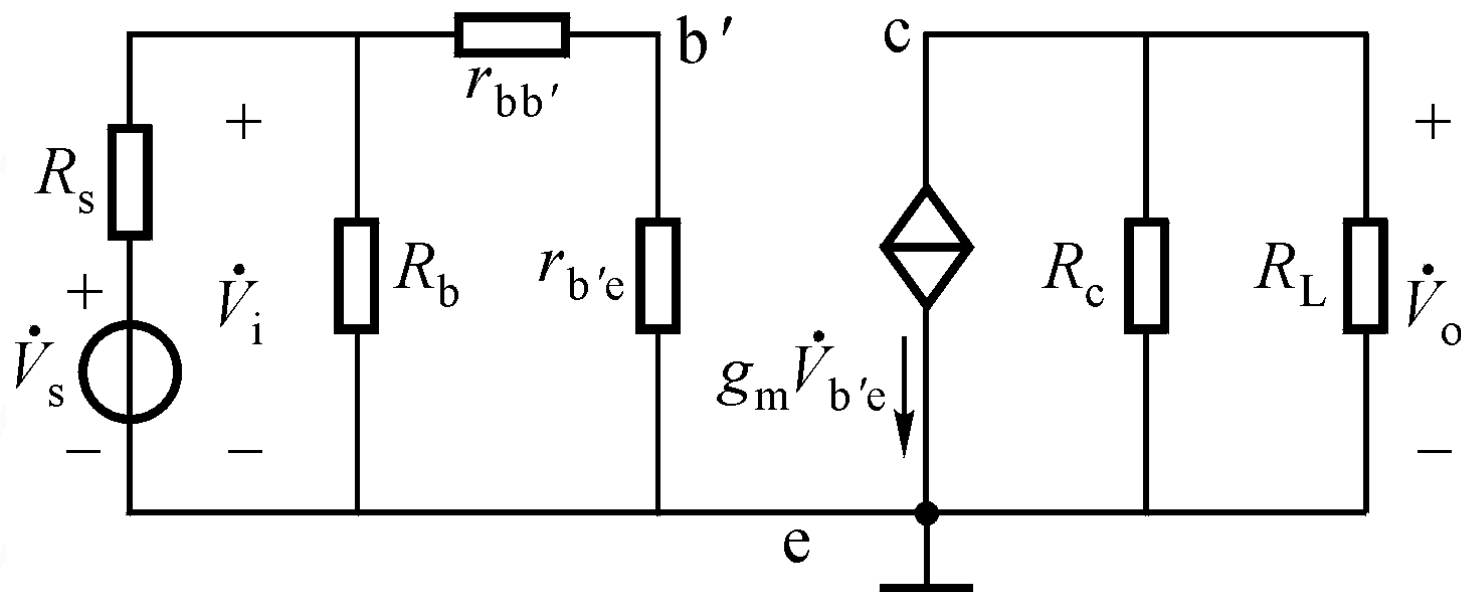
$C$  容抗更小, 交流短路;

$C_i$  容抗减小, 不能忽略。



高频段等效电路

## 中频段电压放大倍数

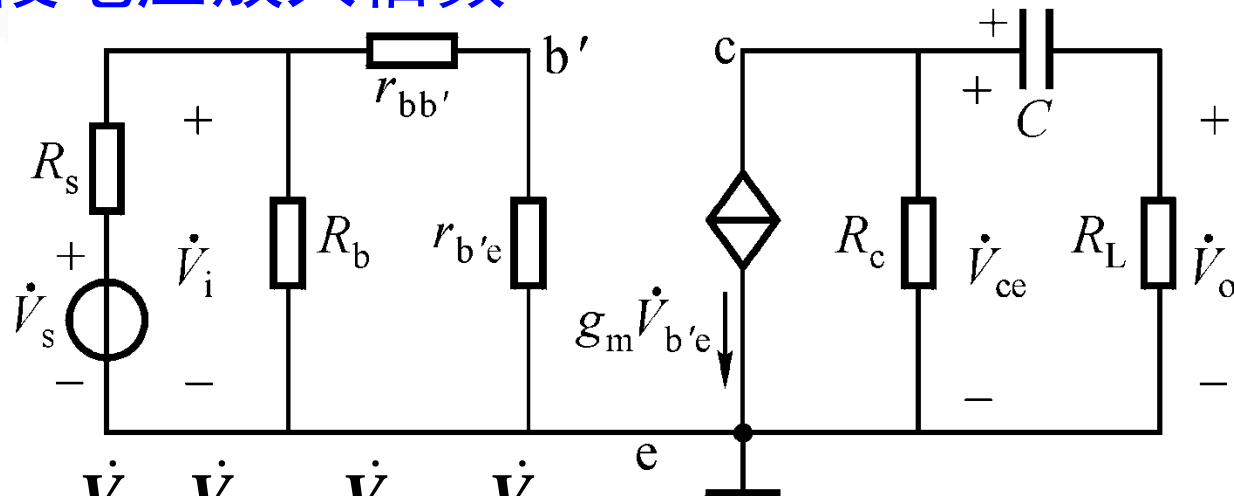


$$\dot{A}_{vsm} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\dot{V}_{b'e}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{b'e}} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R'_L)$$

与以前所求的低频电压放大倍数（实为音频，即中频段）是**一致**的。



## ➤ 低频段电压放大倍数



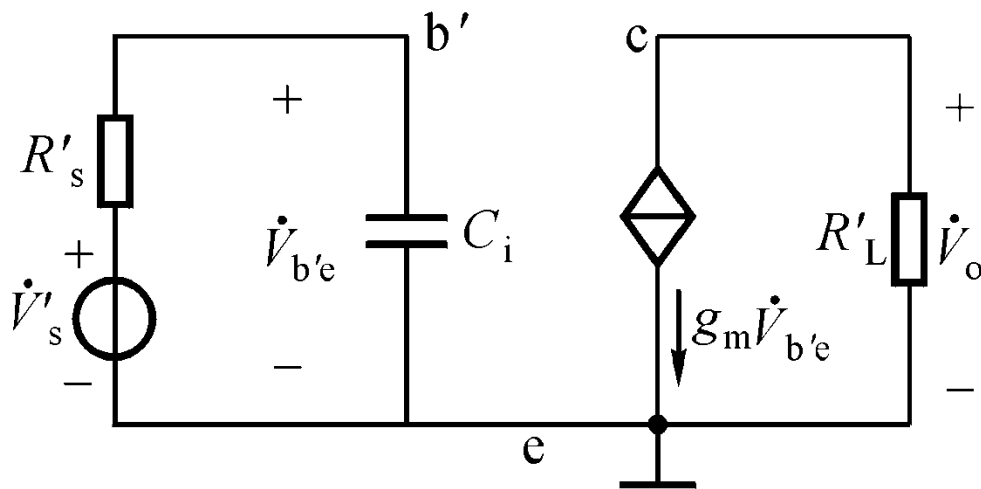
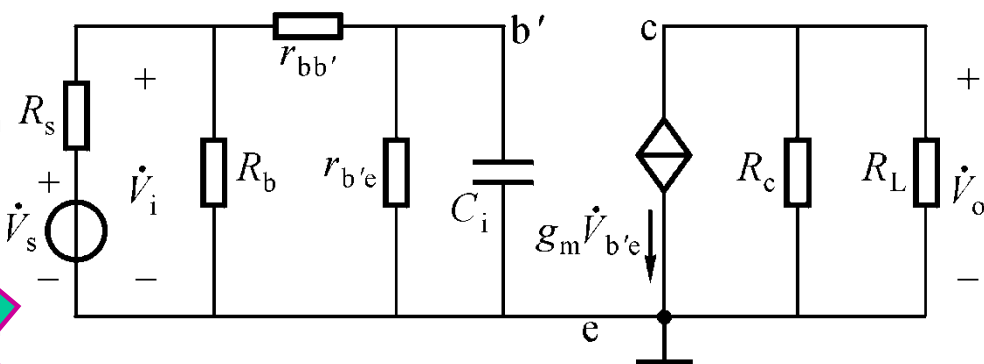
$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{vsL} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\dot{V}_{b'e}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_{ce}}{\dot{V}_{b'e}} \cdot \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{ce}} \\
 &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \left( -g_m \left[ R_c \parallel \left( R_L + \frac{1}{j\omega C} \right) \right] \right) \cdot \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{j\omega C}} \\
 &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \left( -g_m R'_L \right) \cdot \frac{j\omega(R_c + R_L)C}{1 + j\omega(R_c + R_L)C} \\
 &= \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{j\omega(R_c + R_L)C}{1 + j\omega(R_c + R_L)C}
 \end{aligned}$$



设  $\tau_L = C(R_c + R_L)$  则  $f_L = \frac{1}{2\pi\tau_L} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C}$

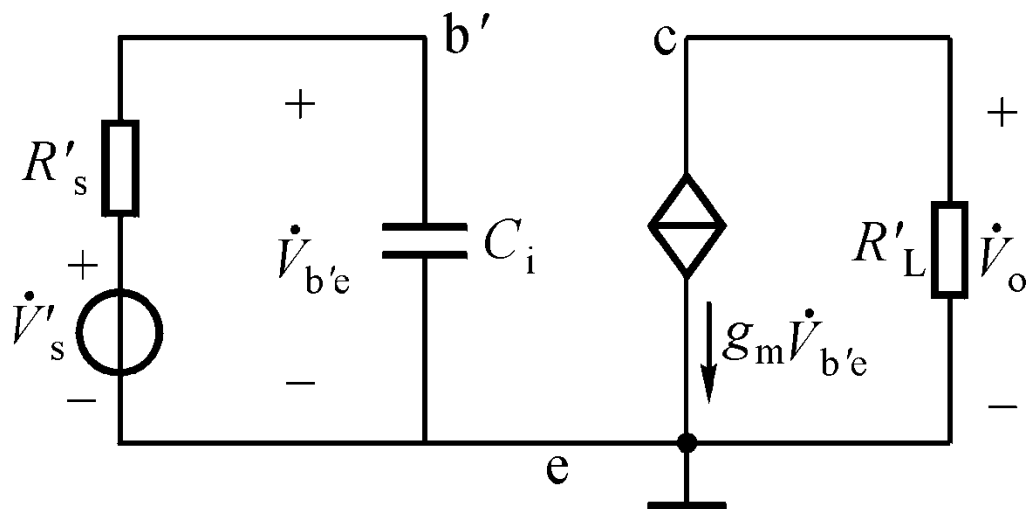
$$\dot{A}_{vsL} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$$

## ➤ 高频段电压放大倍数



$$\dot{V}'_s = \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \dot{V}_i = \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{V}_s$$

$$R'_s = r_{b'e} // [r_{bb'} + R_s // R_b]$$



设  $\tau_H = R'_s C_i$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi R'_s C_i}$$

则

$$\begin{aligned} \dot{A}_{vsH} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_s'}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\dot{V}_{b'e}}{\dot{V}_s'} \cdot \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{b'e}} \\ &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{j\omega C_i}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_i}} \cdot (-g_m R'_L) \\ &= \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R'_s C_i} \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{vsH} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + jf / f_H}$$

➤ 全频段电压放大倍数的表达式：

$$\dot{A}_{vs} \approx \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L} \cdot \frac{1}{1 + jf / f_H}$$

在中频段，因  $f_H \gg f \gg f_L$ ，上式近似为  $\dot{A}_{vs} \approx \dot{A}_{vsm}$

在高频段，因  $f \gg f_L$ ，上式近似为

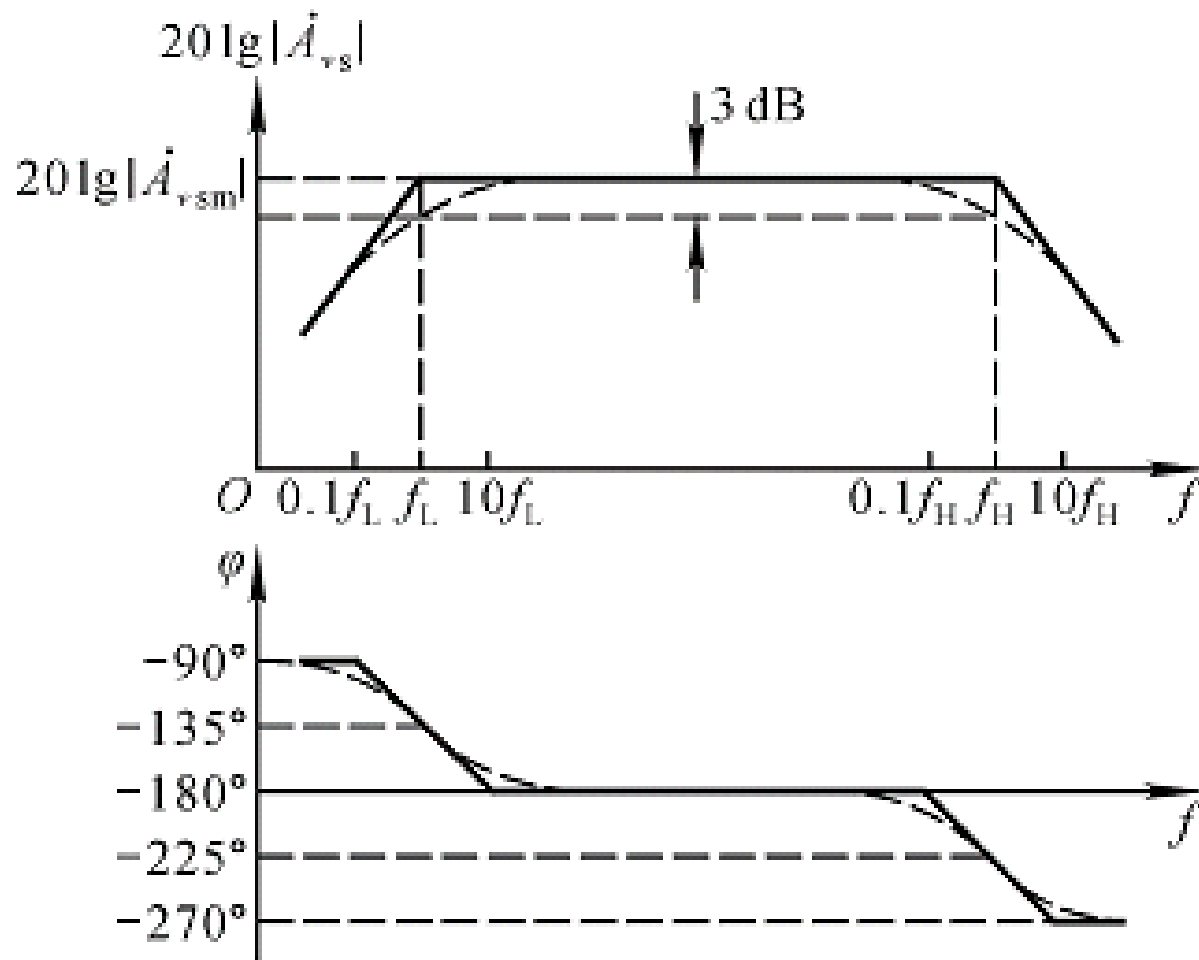
$$\dot{A}_{vs} \approx \dot{A}_{vsH} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + jf / f_H}$$

在低频段，因  $f \ll f_H$ ，上式近似为

$$\dot{A}_{vs} \approx \dot{A}_{vsL} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$$



## 单管共射放大电路的波特图：





## 【例1】

已知一放大电路的频率响应为

$$\dot{A}_{vs} = -46 \cdot \frac{jf / 50\text{Hz}}{1 + jf / 50\text{Hz}} \cdot \frac{1}{1 + jf / 1.5 \times 10^6 \text{Hz}}$$

分别写出其对数幅频特性和相频特性的表达式，并画出相应的波特图。

【解】 其对数幅频特性表达式为：

$$\begin{aligned} 20\lg|\dot{A}_v| &= 20\lg 46 + 20\lg(f / 50) - 20\lg\sqrt{1 + (f / 50)^2} \\ &\quad - 20\lg\sqrt{1 + (f / 1.5 \times 10^6)^2} \end{aligned}$$

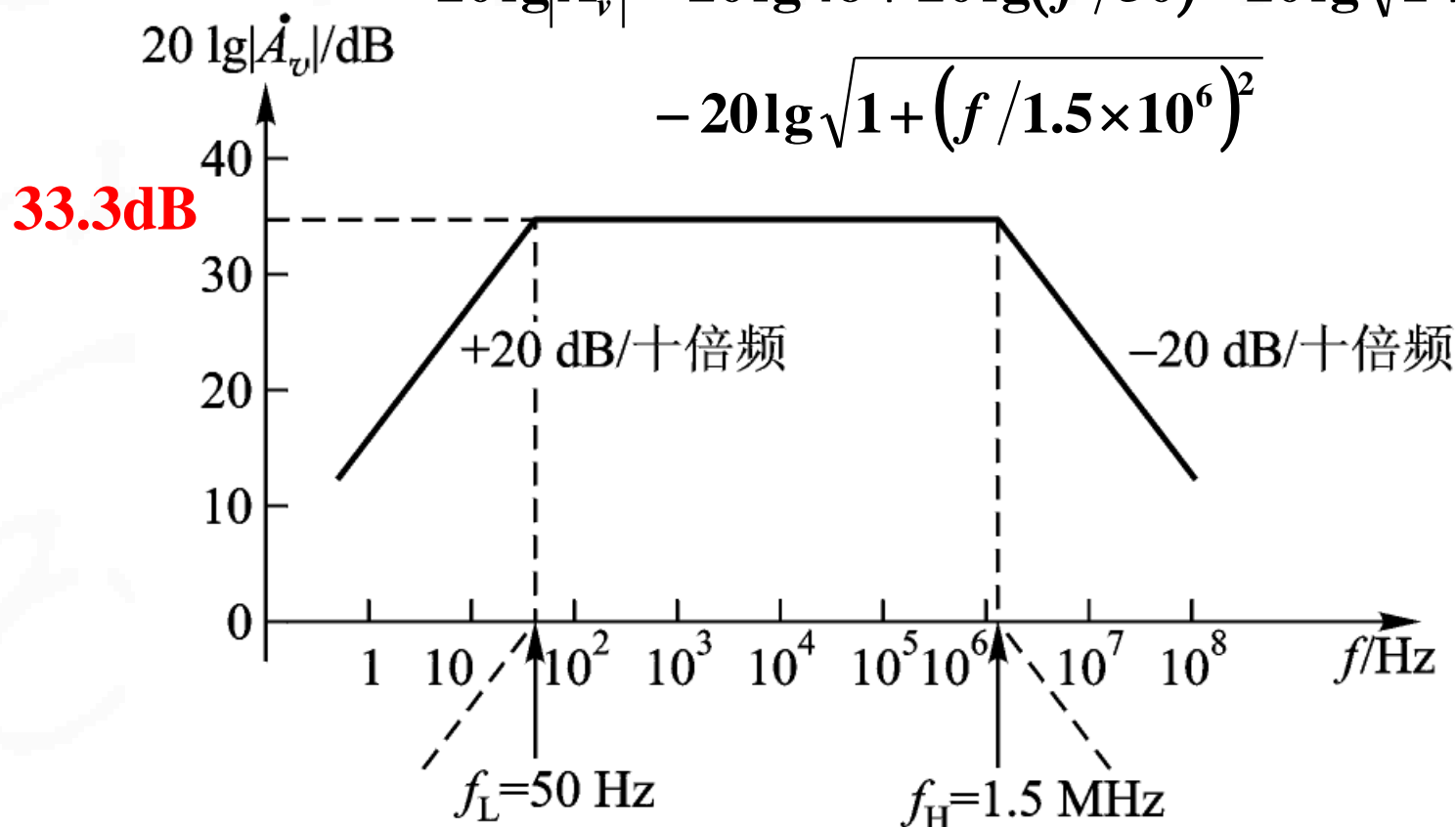
其对数相频特性表达式为：

$$\varphi = -180^\circ + 90^\circ - \arctan(f / 50) - \arctan(f / 1.5 \times 10^6)$$

■ 先画幅频特性曲线：

$$\dot{A}_v = -46 \cdot \frac{jf / 50\text{Hz}}{1 + jf / 50\text{Hz}} \cdot \frac{1}{1 + jf / 1.5 \times 10^6 \text{Hz}}$$

$$20\lg|\dot{A}_v| = 20\lg 46 + 20\lg(f / 50) - 20\lg\sqrt{1 + (f / 50)^2} - 20\lg\sqrt{1 + (f / 1.5 \times 10^6)^2}$$



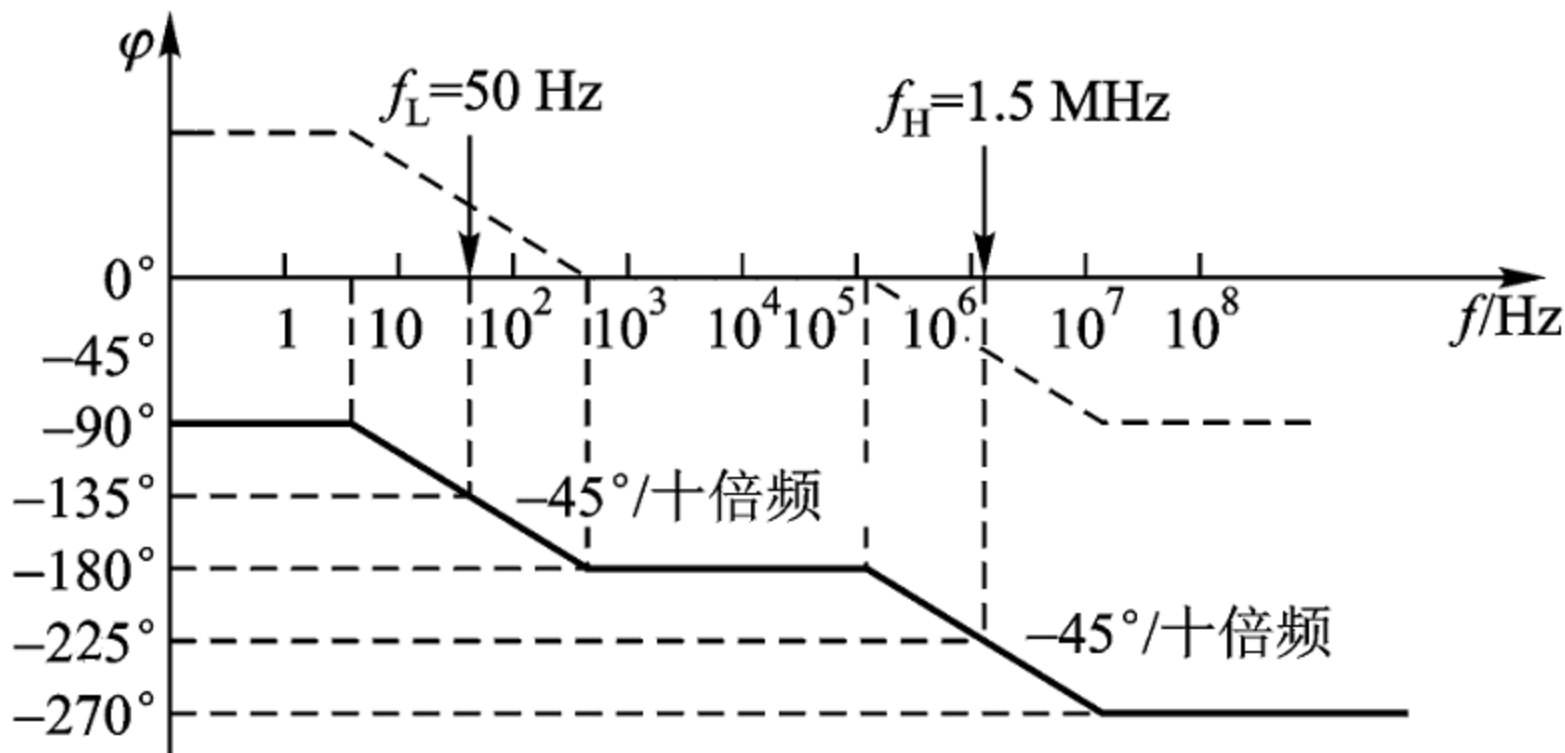
上限频率  $f_H = 1.5\text{MHz}$

下限频率  $f_L = 50\text{Hz}$

■ 再画相频特性曲线：

$$\dot{A}_v = -46 \cdot \frac{jf / 50\text{Hz}}{1 + jf / 50\text{Hz}} \cdot \frac{1}{1 + jf / 1.5 \times 10^6\text{Hz}}$$

$$\varphi = -180^\circ + 90^\circ - \arctan(f / 50) - \arctan(f / 1.5 \times 10^6)$$



## 四、多级放大电路的频率特性

- ✧ 多级放大电路中，每级放大电路均可能存在耦合电容、旁路电容和晶体管的极间电容，因而其频率响应相应地存在多个低频和高频转折频率。

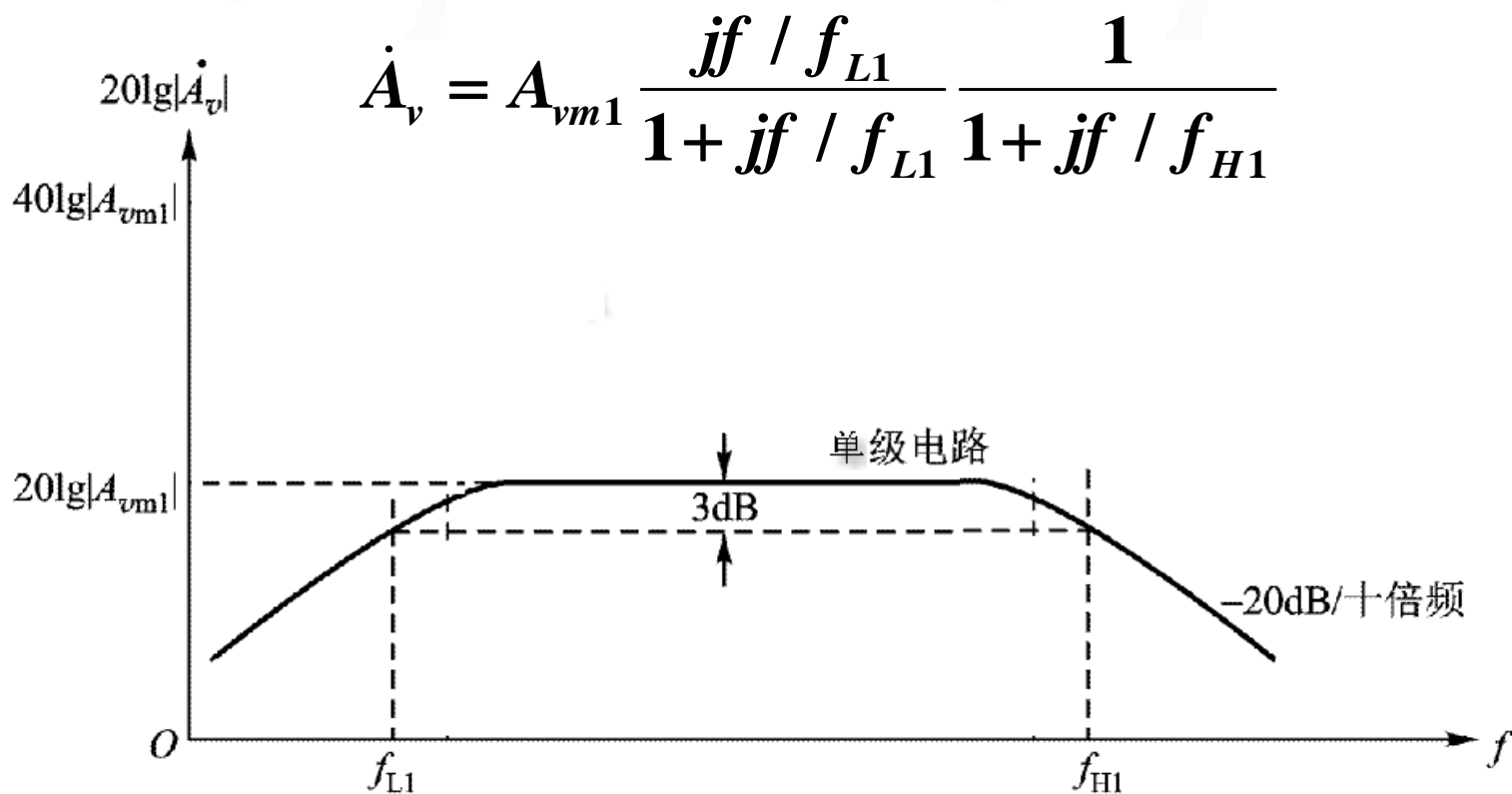
$$\dot{A}_v \approx \dot{A}_{vm} \prod_k \frac{jf / f_{Lk}}{1 + jf / f_{Lk}} \prod_i \frac{1}{1 + jf / f_{Hi}}$$

- ✧ 低频转折频率和高频转折频率的个数由放大电路中的电容个数所决定，其数值则与电容所在回路的时间常数相关。



## 【示例】两级放大电路的频率特性

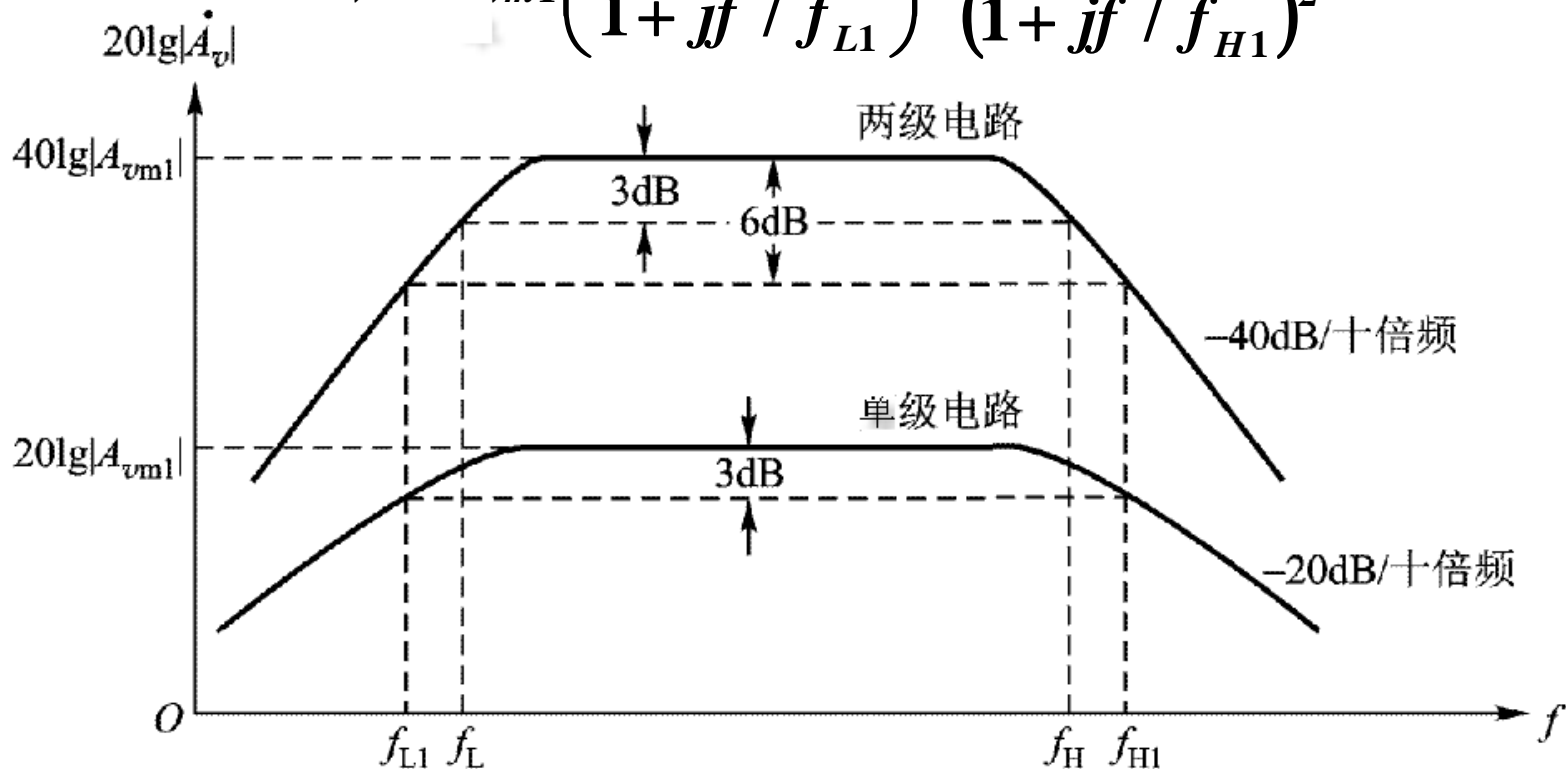
以一个两级放大电路为例，设组成该电路的两个单管放大电路具有相同的频率响应。



单级放大电路的幅频特性

则两级放大电路的频率响应为

$$\dot{A}_v = A_{vm1}^2 \left( \frac{jf / f_{L1}}{1 + jf / f_{L1}} \right)^2 \frac{1}{(1 + jf / f_{H1})^2}$$



✧ 中频段电压放大倍数提高

✧ 通频带变窄



## ➤ 小结与讨论：多级放大电路的频率响应特性

对于 $n$ 级放大电路，整个电路的通频带一定比组成它的任何一级都要**窄**。或者说，整个电路的下限频率一定高于任何一级的下限频率；上限频率一定低于任何一级的上限频率。

在**工程上**可以认为，当某级的下限频率 $f_L$ 远高于其他各级的下限频率时，则可认为整个放大电路的下限频率 $\approx f_L$ 。当某级的上限频率 $f_H$ 远低于其他各级的上限频率时，则整个放大电路的上限频率 $\approx f_H$ 。

## 【例2】

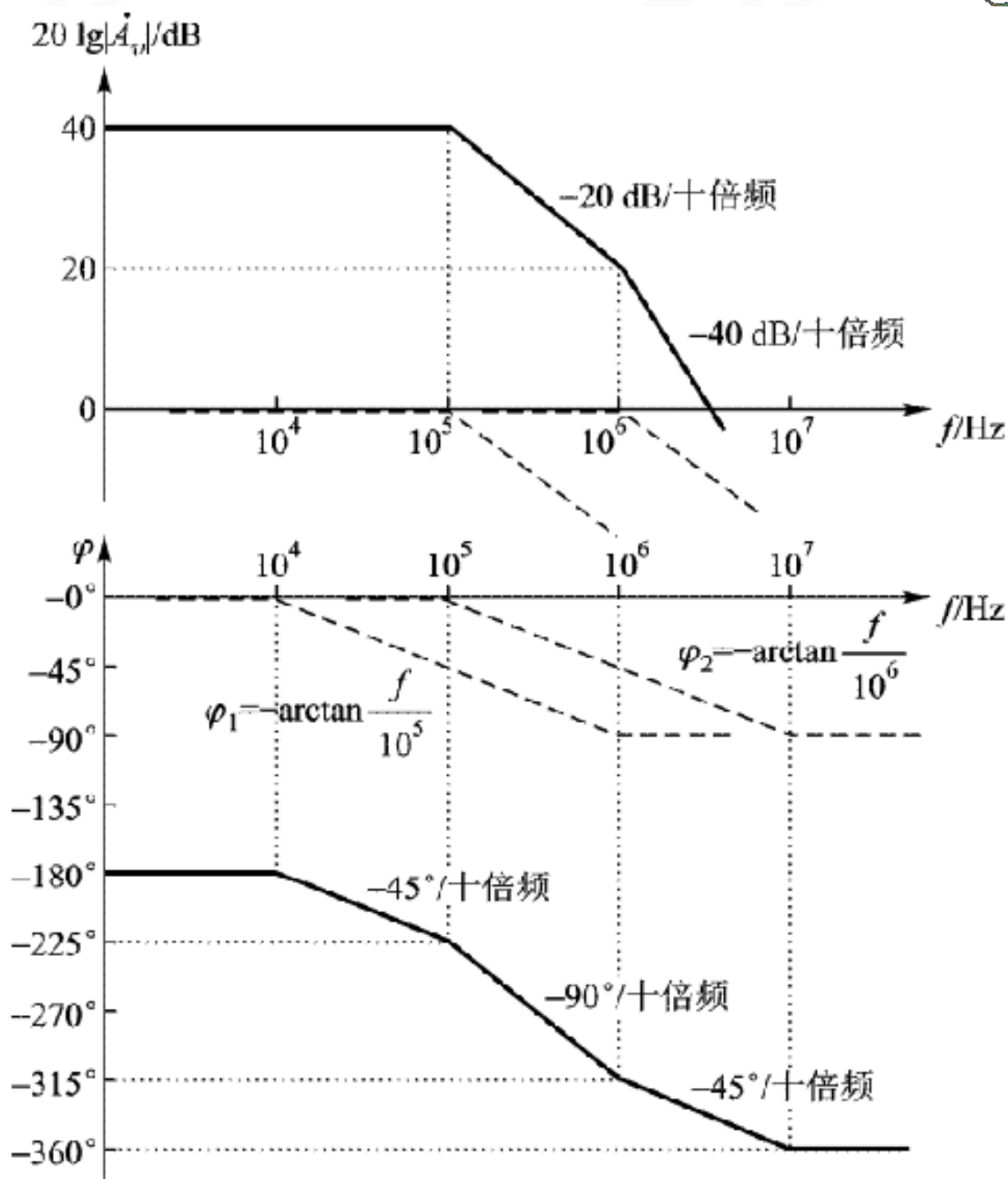
已知一多级放大

$$\dot{A}_v = -100 \cdot \frac{1}{1+j}$$

试画出它的波特图，

【解】

因  $100 \text{ kHz} \ll 1 \text{ Mhz}$ ，整个电路  
的上限频率为：  
 $f_H \approx 100 \text{ kHz}$





## 本节重点提示:

- ✧ 理解级间耦合的方式及特点。
- ✧ 会计算多级放大电路的性能指标（重要）。
- ✧ 理解频率特性的原因（不同类型电容对频率响应的影响）、含义。
- ✧ 理解分频段分析的基本思路、及放大电路的频率表达式。
- ✧ 会画放大电路给定频率特性表达式的BODE图。



# 作业：

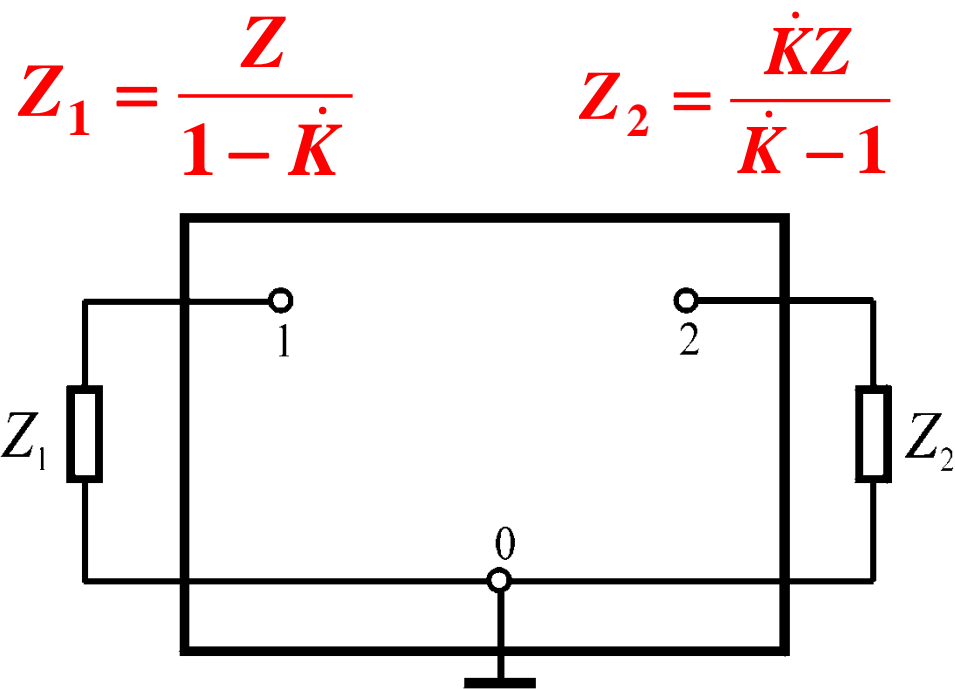
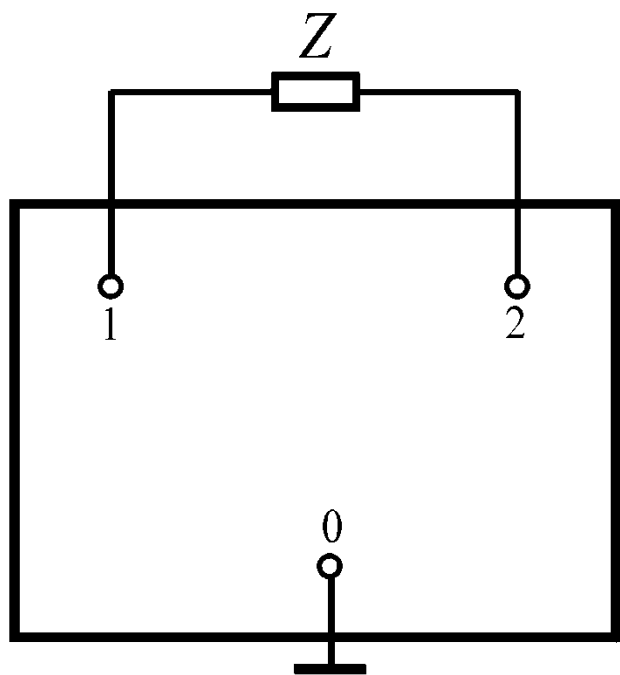
**题1.17**

**题1.28**

**题1.30**

## ➤ 附：密勒定理

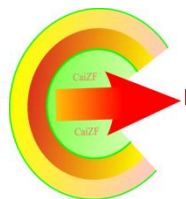
连接在任意两个节点之间的电抗 $Z$ 可等效为这两个节点对公共端的两个电抗 $Z_1$ 、 $Z_2$ 。



$$\dot{K} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1}$$



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.5

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年